MENTE y CEREBRO
Cuadernos
N.º 6 - 2013
6,90 €
investigacionyciencia.es

# EL MUNDO DE LOS SENTIDOS

## Psicología y neurobiología de la percepción

**OLFATO**
El origen de los olores

**AUDICIÓN**
Efectos del ruido en la cognición

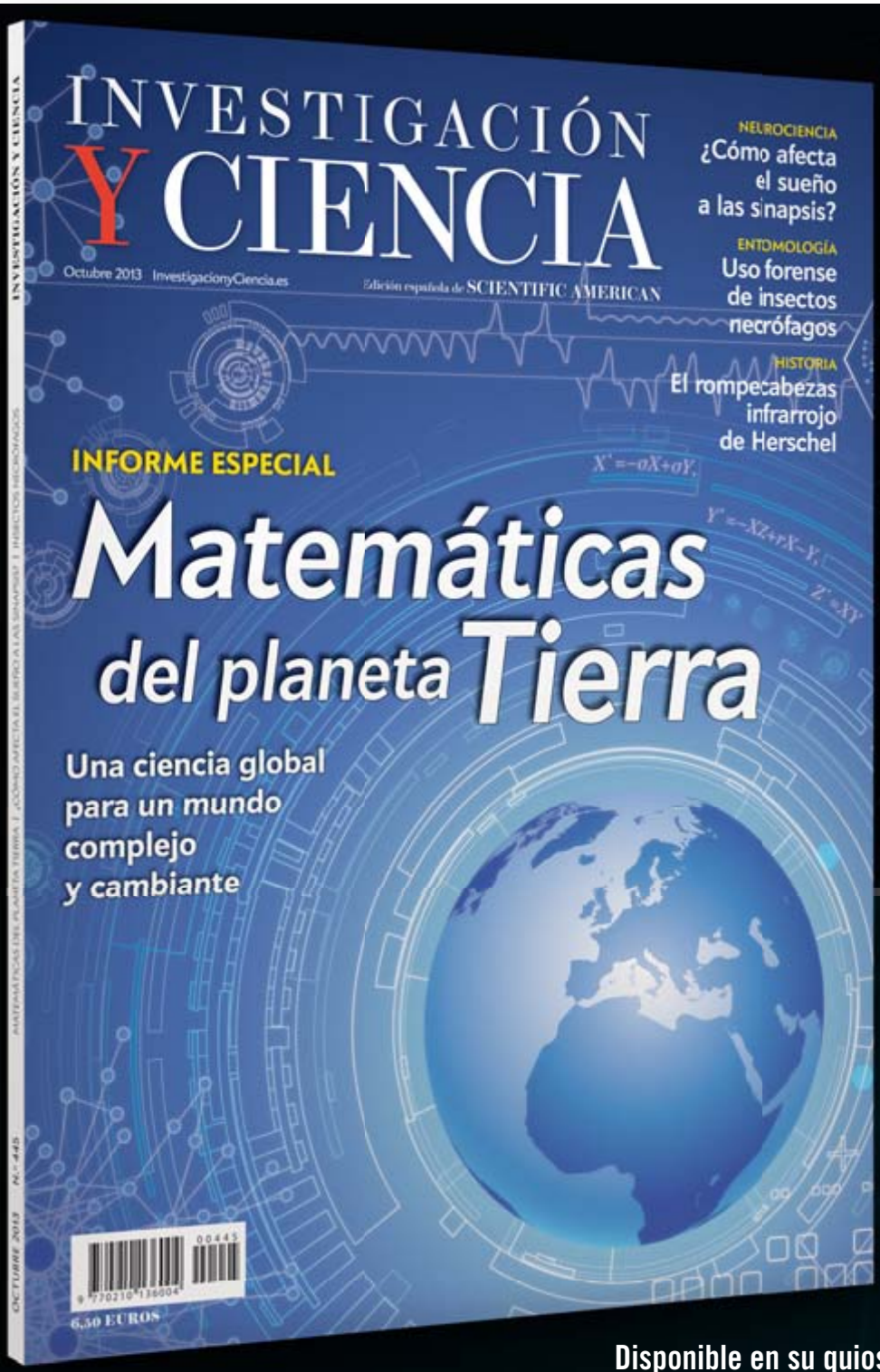
**VISIÓN**
Ver en tres dimensiones

**MULTISENSORIALIDAD**
Procesos mentales en la sinestesia

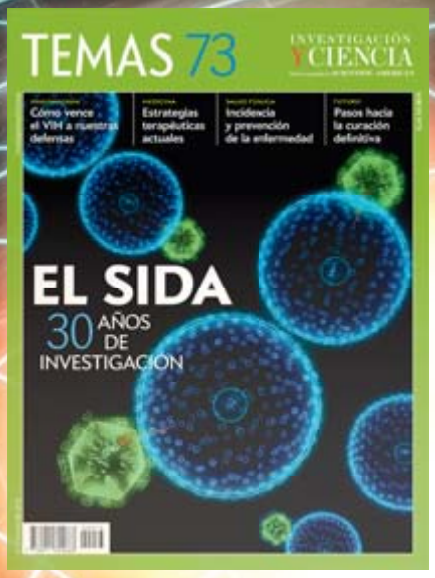
Cuadernos MENTE y CEREBRO
3.er CUATRIMESTRE 2013

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

MENTE y CEREBRO




Disponible en su quiosco el número de octubre



Suscríbase a la versión **DIGITAL**
de todas nuestras publicaciones
y acceda al contenido completo
de todos los números (en pdf)*

**www.investigacionyciencia.es**

* Ejemplares de IyC disponibles desde 1996 y el archivo completo de MyC, TEMAS y CUADERNOS

MENTE y CEREBRO
Cuadernos

3er cuatrimestre de 2013 – N.º 6

**COLABORADORES DE ESTE NÚMERO**

**Asesoramiento y traducción:**

Federico Fernández Gil: *Las claves de los movimientos sacádicos*; F. Asensi: *Imágenes en tres dimensiones, Recuperar el silencio*; Lusi Bou: *Dos ojos, dos visiones, Espejito, espejito...*; Álex Santatala: *La importancia de los espacios vacíos, Aroma a medida, Realidad virtual tangible*; Mar Sanz Prevosti: *Ruido, ruido, ruido, Cuestión de gustos, Yo sin mi cuerpo*; Ignacio Navascués: *¿Quién llama?, El origen de los olores*; Noelia de la Torre: *No quiero sopa*; I. Nadal: *Sentido del tacto*; M.ª Luisa Vea Soriano: *¿Diestra o siniestra?, Sinfonía en rojo*; David Barbero: *Integración sensorial*

**Portada:** Thinkstock

**Mente y cerebro**

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Yvonne Buchholz, Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

**Edita**

Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

**Gehirn und Geist**

CHEFREDAKTEUR: Carsten Könneker (verantwortlich)
ARTDIRECTOR: Karsten Kramarczik
REDACTIONSLEITER: Steve Ayan
REDAKTION: Katja Gaschler, Christiane Gelitz, Andreas Jahn (Online-Koordinator), Frank Schubert, Claudia Wolf
FREIE MITARBEIT: Christoph Böhmert, Joachim Marschall
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg, Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann, Anke Lingg, Gabriela Rabe
REDAKTIONSASSISTENZ: Inga Merk
VERLAGSLEITER: Richard Zinken
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck

**Distribución**

**para España:**
**LOGISTA, S. A.**
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

**para los restantes países:**
**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona - Tel. 934 143 344

**Publicidad**

**Barcelona**
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14, 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

**Madrid**
New Planning
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Copyright © 2013 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69126 Heidelberg
Copyright © 2013 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)
Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista.

ISSN 2253-959X Dep. legal: B. 3021 – 2012
Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)
Printed in Spain - Impreso en España

# SUMARIO

## VISTA

**4 Las claves de los movimientos sacádicos**
Movemos los ojos hasta tres veces por segundo. Sin embargo, el mundo se nos aparece completamente quieto y estable. Un ingenioso mecanismo del cerebro se encarga de ello. *Por Anna von Hopffgarten*

**10 Imágenes en tres dimensiones**
La creciente producción de películas en 3D saca provecho del procedimiento que utiliza el cerebro para construir una imagen en relieve de los objetos. ¿Cómo funciona? *Por Alain Lieury*

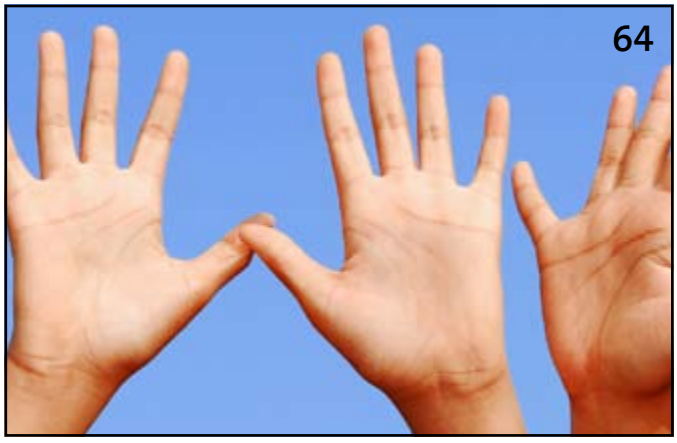
**14 Dos ojos, dos visiones**
Cada uno de nuestros ojos percibe un mundo distinto, ello proporciona matices en la percepción de la profundidad. *Por Vilayanur S. Ramachandran y Diane Rogers-Ramachandran*

**18 La importancia de los espacios vacíos**
Nuestra visión no es continua. Como una videocámara, toma una imagen diez veces por segundo. *Por Isabelle Bareither*

## OÍDO

**22 Ruido, ruido, ruido**
En la oficina, en la calle, incluso en clase. Hoy en día, el ruido resulta casi omnipresente. ¿Cómo combatir sus efectos nocivos? *Por Jürgen Hellbrück, Sabine Schlittmeier y Maria Klatte*

**28 Recuperar el silencio**
Los acúfenos se originan en el cerebro. Aunque no se conoce por ahora una cura definitiva, la estimulación cerebral y la terapia sonora parecen mejorar los síntomas. *Por Tobias Kleinjung y Berthold Langguth*





**34 ¿Quién llama?**
Hasta ahora, los médicos atribuían la incapacidad de reconocer la voz del interlocutor a una lesión cerebral. Sin embargo, parece que este trastorno también puede tener un origen congénito. *Por Annegret Faber*

**GUSTO Y OLFATO**

**38 Aroma a medida**
Nuestra nariz distingue entre miles de sustancias olorosas, incluso entre aquellas que se asemejan en su composición química. La corteza olfatoria utiliza para ello una especie de interruptor basculante. *Por Jörn Niessing*

**44 El origen de los olores**
Los receptores olfativos se alojan, además de en la nariz, en lugares insospechados del cuerpo humano. Entre ellos, la próstata y el intestino grueso. *Por Hanns Hatt y Regine Dee*

**48 Cuestión de gustos**
*¿Sushi* o carne a la brasa? La elección del menú no depende solo de las experiencias y el entorno cultural. El gusto de cada uno también influye. *Por Angelika Bauer-Delto*

**52 No quiero sopa**
¿Por qué a la mayoría de los niños les gustan las golosinas pero detestan las coles de Bruselas? ¿Se les puede enseñar a alimentarse de manera sana? *Por Herbert Renz-Polster*

**TACTO Y CONSCIENCIA CORPORAL**

**58 Sentido del tacto**
La investigación de la percepción táctil se encuentra todavía en mantillas, aunque promete resultados de interés médico, por ejemplo, en lo referente a la anorexia nerviosa. *Por Martin Grunwald*

**64 ¿Diestra o siniestra?**
La corteza cerebral derecha transmite las sensaciones a la mitad izquierda del cuerpo, y viceversa. No obstante, tal principio omite parte de la realidad: el cerebro nos «vende» un lado u otro según la situación. *Por Michael Springer*

**70 Espejito, espejito...**
Algunas reflexiones sobre la conocida, pero enigmática, naturaleza del espejo. *Por Vilayanur S. Ramachandran y Diane Rogers-Ramachandran*

**MULTISENSORIALIDAD**

**74 Integración sensorial**
Los cinco sentidos cooperan para que percibamos el entorno de forma integral. A veces, incluso, se funden entre sí. *Por Christoph Kayser*

**78 Sinfonía en rojo**
Algunas personas saborean el tacto u oyen la música de colores. En la sinestesia participan tanto las áreas sensoriales del cerebro como los procesos mentales. *Por Danko Nikolić y Uta Maria Jürgens*

**84 Realidad virtual tangible**
Investigadores del Instituto Max Planck de Biocibernética en Tubinga ponen a prueba el trabajo conjunto de los sentidos para explorar la percepción humana. *Por Vinzenz Schönfelder*

**92 Yo sin mi cuerpo**
Ciertos trastornos cerebrales conllevan vivencias extracorporales. La realidad virtual permite reproducir tal experiencia. *Por Olaf Blanke, Bigna Lenggenhager y Lukas Heydrich*

# Las claves de los movimientos sacádicos

Movemos los ojos hasta tres veces por segundo. Sin embargo, el mundo se nos aparece completamente quieto y estable. Un ingenioso mecanismo del cerebro se encarga de ello

ANNA VON HOPFFGARTEN

EN SÍNTESIS

### Fundido de imágenes

1 Mientras nuestros ojos se desplazan con rapidez, una imagen del mundo se mueve deprisa sobre la retina.

2 Con el fin de evitar las imágenes borrosas, el cerebro suprime la información visual durante el movimiento sacádico de los ojos; incluso desde un poco antes.

3 Las lagunas perceptivas que se producen se «rellenan» con impresiones sensoriales posteriores. De esta manera, el entorno nos aparece estable y continuo.

Numerosos profesores de biología se arman con una videocámara para ilustrar a sus alumnos en el funcionamiento del ojo humano. Al igual que nuestro órgano visual, el dispositivo de reproducción posee una lente para focalizar. La imagen del entorno que capta se refleja de forma invertida sobre unos sensores fotosensibles, los cuales —indicaría el docente a sus oyentes— se corresponden con las células sensoriales de nuestra retina. Un diafragma (en el ojo, el iris) regula el caudal de luz. Mas, atención, la comparación entre el ojo humano y la cámara de vídeo se tambalea en un punto: si movemos esta última de forma brusca y rápida, tal y como desplazamos las personas nuestra mirada, apenas reconoceríamos nada de las imágenes filmadas, salvo, en todo caso, escenas movidas y borrosas. En cambio, nuestra vista nos transmite un entorno nítido y estable. ¿Cómo es posible?

Valga un simple experimento para resolver el misterio. Siga el lector los siguientes pasos: colóquese frente a un espejo y fije la mirada en uno de sus ojos, ahora en el otro; siga alternando su vista durante un rato más. Observe en todo momento su pupila, advierta cómo se mueve. De inmediato se percatará de que, por mucho que se esfuerce, la encomienda le resulta imposible: no es capaz de ver su propio ojo en movimiento. En cambio, si solicita a una persona que mire por encima de su hombro mientras usted intenta el ejercicio, esta le confirmará que puede seguir sin problemas los desplazamientos oculares rápidos (movimientos sacádicos) de sus ojos.

Al parecer, estamos ciegos con respecto a los movimientos sacádicos. En fracciones de segundo, algún mecanismo elimina de nuestra retina la escena borrosa que originan las «sacudidas». Raymond Dodge (1871-1942), psicólogo estadounidense, constató dicho fenómeno a comienzos del siglo XX. El investigador intercaló entre las sucesivas sacudidas oculares de los probandos un haz de luz. Al poco observó que los sujetos eran incapaces de percibir tales movimientos (supresión sacádica).

¿Acaso tiene nuestro cerebro encomendada la tarea de suprimir esta información visual? En los años ochenta del siglo XX, Barry Richmond y sus colaboradores del Instituto Nacional de Salud Mental de Bethesda negaban tal posibilidad. Suponían lisa y llanamente que las imágenes se

FOTOLIA / JEREMIAS MÜNCH

**VISIÓN INALTERABLE**
Aunque nuestros ojos se hallen en permanente movimiento, percibimos el entorno nítido e inmóvil.

BPK BERLIN

GEHIRN UND GEIST; FUENTE: *EYE MOVEMENTS AND VISION*, A. L. YARBUS, PLENUM PRESS, 1967

**VERSIÓN ESCÁNER**
Al contemplar un objeto, nuestra vista salta con rapidez de un punto al siguiente. La imagen de la derecha muestra el rastro de los movimientos de los ojos de un sujeto que contempla el busto de Nefertiti (*izquierda*).

desplazaban demasiado rápido durante los movimientos sacádicos como para que el «lento» cerebro pudiera procesarlos.

## Supresión activa

Años más tarde, en 2002, el grupo dirigido por Klaus-Peter Hoffmann, de la Universidad Ruhr de Bochum, descubrió que la realidad era otra: el cerebro suprime la percepción durante el tiempo de las sacudidas oculares. El equipo entrenó a ejemplares de macacos rhesus, ya sea para que ejecutaran un movimiento sacádico ante un patrón de manchas, ya para que fijaran la vista en un punto mientras el modelo se desplazaba en un segundo plano. La imagen en la retina de los animales fue idéntica en ambos casos. Con ayuda de electrodos finos, los neurobiólogos midieron la actividad eléctrica de las células nerviosas del área temporal medial (TM), así como las de la corteza temporal medial superior (TMS) de los primates. Escogieron dichas regiones del lóbulo temporal a propósito, pues las neuronas que albergan responden de manera selectiva al movimiento en el campo visual.

Con sorpresa comprobaron que las células reaccionaban de modo diferente según se tratara de una sacudida que provocaba el desplazamiento de la imagen en la retina o del patrón que se trasladaba a la misma velocidad ante los ojos de los monos. Cuando los propios animales causaban el movimiento en su retina, la tasa de descarga de las neuronas se reducía. Por el contrario, un estímulo de movimiento exterior carecía de efecto sobre la tasa de actividad.

Las células del área TM o TMS y las de la región ventral intraparietal del lóbulo temporal del macaco rhesus ajustan su actividad incluso antes del movimiento ocular, tal y como descubrió el grupo de Frank Bremmer, de la Universidad de Marburg, en 2009. A este hallazgo se sumó que la tasa de descarga de los monos cambiaba de

### Cuatro tipos de movimientos oculares

- **Movimientos sacádicos:** son movimientos rápidos de los ojos que permiten colocar la imagen de un objeto sobre la fóvea (zona de mayor agudeza visual de la retina). Una forma especial corresponde a los movimientos microsacádicos, minúsculas vibraciones del ojo, cuya función falta por aclarar.
- **Movimientos de seguimiento:** permiten al ojo mantener en la fóvea la imagen de un objeto que se mueve lentamente.
- **Reflejo vestíbulo-ocular:** compensa los movimientos de la cabeza y el tronco. Si giramos la cabeza hacia un lado mientras contemplamos un objeto, movemos los ojos en dirección contraria.
- **Reflejo optocinético:** fenómeno que experimentamos cuando viajamos en tren. Si miramos por la ventana, los ojos persiguen un objeto en el paisaje durante un corto tiempo; a continuación saltan atrás para seguir, finalmente, otro nuevo objeto.

forma similar a como sucedía en los humanos. En un experimento anterior, Mark Diamond, de la Universidad de Australia Occidental en Perth, mostró a sus probandos pequeñas elipses grises con rayas blancas que aparecían en un monitor en diferentes momentos de los movimientos sacádicos de los participantes. Entre presentación y presentación variaba el contraste de las zonas oscuras y claras de la figura. Tan pronto como el sujeto veía la elipse, debía presionar una tecla.

Tal y como se esperaba, los sujetos detectaban mejor el estímulo cuanto mayor era el contraste

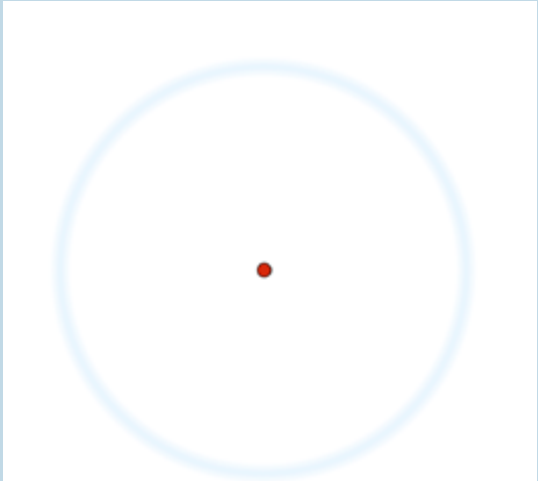
## Temblores enigmáticos

**Los ojos se encuentran permanentemente en movimiento.** Cuando leemos o examinamos la cara de nuestro interlocutor, o incluso cuando dirigimos la vista con énfasis a un objeto, nuestras pupilas vibran de acá para allá sin que lo percibamos. En 1860, el médico y físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) advirtió que resulta imposible mantener los ojos completamente quietos. El motivo: ejecutamos movimientos microsacádicos, una forma especial de sacudidas oculares.

Existen numerosas hipótesis de por qué nadie mantiene quietos sus globos oculares. Una de ellas afirma que los minúsculos desplazamientos oculares posibilitan la corrección de ligeras desviaciones en el movimiento de los ojos. Nuestra vista no salta de un lado a otro, sino que se desplaza despacio y sin que lo advirtamos en una dirección. En los años sesenta del siglo XX, Tom Cornsweet, de la Universidad de California en Irvine, postuló que el ojo siempre vuelve a saltar al objeto de destino tan pronto como se aleja demasiado del mismo.

Según otra teoría, los movimientos microsacádicos evitan que las células fotosensibles de la retina se fatiguen al fijarse en una imagen monótona. Los pequeños movimientos oculares se ocupan de que los fotorreceptores no sean excitados por los mismos estímulos luminosos durante mucho tiempo. De esta forma, reciben una y otra vez nuevas informaciones a las que reaccionan con un impulso fresco.

En 1953, Lorrin Riggs, de la Universidad Brown en Providence, descubrió junto con sus colegas qué ocurre cuando las neuronas retinianas son estimuladas largo tiempo por el mismo agente externo. Sujetaron lamparillas a lentes de contacto que colocaron a los probandos. La luz seguía en todo momento su mirada, de manera que estimulaba permanentemente las mismas células de la retina; el punto luminoso se hizo invisible para ellos al poco tiempo.



**EFECTO DE ADAPTACIÓN**
Si fijamos la mirada en el punto rojo durante un rato, de un momento a otro desaparecerá de nuestra visión el círculo azul claro que lo rodea. Las células sensoriales de la retina se fatigan.

De modo similar funciona la ilusión que les proponemos bajo estas líneas. Observe fijamente y durante unos instantes el punto rojo del centro del círculo. Tras unos segundos, el contorno azul desaparecerá y percibirá el punto en un fondo completamente blanco. ¿Por qué motivo? Las neuronas de la retina que se activan por la presencia del anillo se fatigan, ya que, tras un rato, el estímulo resulta monótono. Tan pronto usted mueva un poco los ojos, el círculo volverá a aparecer. Dado que la forma geométrica se encuentra en el campo de visión periférico, los minúsculos tremores del ojo apenas contrarrestan la adaptación. Además, si fija la mirada con mayor énfasis, los movimientos se tornarán más escasos y débiles con el tiempo.

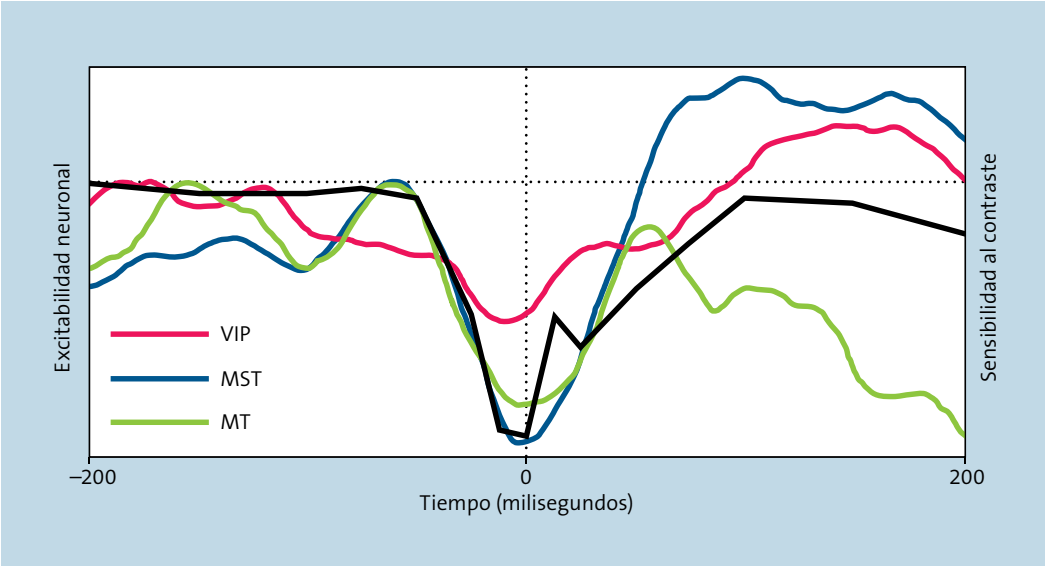
Los movimientos microsacádicos también pueden «escanear» minúsculas áreas espaciales, es decir, colocar potenciales objetos atractivos en el centro de la visión más aguda. Por ello, tendrían la misma función que las sacudidas oculares, pero a una escala menor. Según Ziad Hafed, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, los movimientos microsacádicos se basan en los mismos mecanismos neuronales que las sacudidas de mayor amplitud.

Y más aún. Hafed y sus colaboradores incluso suponen que los pequeños temblores revelan el objeto de nuestro interés oculto, porque predominantemente van en su dirección [*véase* «Las ventanas de la mente», por Susana Martínez-Conde; Investigación y Ciencia, octubre de 2007]. En 2002, lo constataron con un sencillo experimento: pidieron a los probandos que fijaran su vista en un punto en medio de un monitor. En el margen de la pantalla se encontraba una mancha que cambiaba de color después de un tiempo. Tras el cambio de color, las microsacudidas saltaban en esa dirección a menudo.

(«Microsaccades: Small steps on a long way». M. Rolfs en *Vision Research*, vol. 49, págs. 2415-2441, 2009.)

**EL AMORTIGUADOR NEURONAL**

Las células nerviosas del área temporal medial (TM, *verde*), las del área temporal medial superior (TMS, *azul*) y las del área ventral intraparietal (VIP, *rojo*) del cerebro del macaco rhesus inhiben su actividad desde poco antes del comienzo de un movimiento sacádico (*cero del eje X*). La sensibilidad al contraste en los humanos (*negro*) disminuye siguiendo un patrón similar al de los monos.




GEHRN UND GEST; FUENTE: «NEURAL DYNAMICS OF SACCADIC SUPPRESSION», F. BREMMER ET AL. EN *THE JOURNAL OF NEUROSCIENCE*, VOL. 29, N.º 40, OCTUBRE 2009

de los campos de la imagen mostrada. Durante las sacudidas oculares, incluso un poco antes, Diamond tuvo que incrementar el contraste para que los participantes percibieran las elipses. Lo llamativo del ensayo fue que, en relación al comienzo del movimiento sacádico, la sensibilidad al contraste que presentaban los humanos se reducía al mismo tiempo que lo hacía la tasa de activación de las neuronas de los monos de Bremmer. «El sistema visual se prepara para el movimiento de los ojos», concluye el neurofísico.

En 2004, Colin Blakemore y sus colaboradores de la Universidad de Oxford investigaron en qué parte del cerebro se interrumpía el flujo de información justo antes del movimiento sacádico. Para ello utilizaron un truco ingenioso: provocaron en los sujetos ilusiones perceptivas, en concreto, fosfenos. Estos fenómenos luminosos aparecen a través de la estimulación del ojo, del nervio óptico o de áreas de la corteza. Los neurocientíficos estimularon las retinas de los probandos con ayuda de electrodos que adherían junto a sus ojos, o bien las áreas visuales primarias de la corteza mediante estimulación magnética transcraneal (EMT).

Los movimientos sacádicos suprimían la percepción de los estímulos luminosos solo cuando estos se originaban de manera directa en el globo ocular de los probandos. En cambio, cuando la estimulación sucedía en el cerebro, los sujetos percibían los destellos al mover los ojos. Blakemore y su equipo concluyeron que la supresión sacádica tiene lugar en un estadio de procesamiento temprano, incluso antes de que las señales visuales alcancen la corteza cerebral.

Sin embargo, el flujo de información no parece cancelarse por completo entre la retina y la corteza. En 2009, Bart Krekelberg, de la Universidad Rutgers en Newark, halló junto con sus colaboradores que los estímulos que se presentan durante los movimientos oculares rápidos no se procesan en la consciencia, sino en las áreas visuales tempranas.

Los científicos emplearon para su ensayo una ilusión visual. Se trataba de una línea que emitía destellos cortos y hacía aparecer un círculo que acababa convirtiéndose en una elipse. Justo en el momento en que los probandos presentaban una sacudida ocular, los investigadores les mostraban una franja horizontal o vertical. Tan pronto los ojos volvían a estar quietos, se les enseñaba un círculo en el monitor. ¿Veían ahora una elipse horizontal o vertical? Sus respuestas revelaron que la orientación de la franja que se les había enseñado con anterioridad influía en la forma en que percibían el círculo, aunque no habían sido conscientes del estímulo durante la supresión sacádica.

## Sin sacudidas ni interrupciones

Bien mirado, nuestra percepción visual debería estar plagada de continuas y pequeñas lagunas, si tenemos en cuenta que los ojos saltan sin pausa de acá para allá y el cerebro suprime en ese tiempo la visión consciente. ¿Cómo consigue el sistema visual generar de todos modos una imagen continua del entorno? Según una teoría, el cerebro rellena las breves interrupciones con fragmentos perceptivos temporalmente adyacentes. Aun así,

todavía se desconoce el modo en que se produce este «llenado perceptual».

Este desconcertante fenómeno de la percepción resulta frecuente en la vida cotidiana: cuando fijamos nuestra vista en un reloj, algunas veces nos parece como si el segundero permaneciera quieto durante un momento. Ello se debe a que percibimos la primera impresión sensorial tras el movimiento ocular inicial como ligeramente más larga. Se trata de la cronoestasis.

En 2001, el grupo de Kielan Yarrow, de la Universidad de la Ciudad de Londres, comprobó, no sin sorpresa, que la dilatación temporal que se percibía presentaba la misma duración que el movimiento ocular previo: cuanto mayor era el movimiento sacádico, más larga era la pausa. Según experimentos posteriores del mismo equipo, las personas no solo percibimos con más duración la imagen sobre la que se posa nuestra vista, sino que, además, aparece subjetivamente con anterioridad.

¿Cómo se mide algo así? Yarrow y sus colaboradores dejaron de nuevo que los probandos ejecutaran sacudidas oculares. Mientras tanto, emitieron un tono corto. A continuación les mostraron un cuadrado. Los probandos debían indicar si les habían enseñado el cuadrado antes o después del ruido. Según afirmaron, habían percibido la figura geométrica antes del tono, aunque se les había presentado después.

Al parecer, el cerebro retrotae los acontecimientos en el movimiento sacádico y los prolonga hasta que los ojos vuelven a estar quietos. En otras palabras, rellena la laguna perceptiva producida durante la supresión sacádica con impresiones sensoriales ulteriores. En consecuencia, el entorno nos aparece nítido, sin sacudidas ni interrupciones.

Si lo desea, el lector puede experimentar el fenómeno en su propia piel: frente al espejo, fije de nuevo la mirada de manera alterna en sus ojos, saltando de uno a otro. Como comprobó antes, no percibe el movimiento de sus pupilas. Ahora bien, preste atención a lo que observa en su lugar. ¿Ve un centelleo? ¿O quizá nada en absoluto? Ninguna de las dos opciones. Siempre verá unos ojos completamente quietos.

***Anna von Hopffgarten*** *es bióloga y redactora de* Gehirn und Geist, *edición alemana de* Mente y cerebro.

## Para saber más

**Illusory perceptions of space and time preserve cross-saccadic perceptual continuity.** K. Yarrow et al. en *Nature*, vol. 414, págs. 302-305, 2001.

**Neural mechanisms of saccadic suppression.** A. Thiele et al. en *Science*, vol. 295, págs. 2460-2462, 2002.

**Neural dynamics of saccadic suppression.** F. Bremmer et al. en *Journal of Neuroscience*, vol. 29, págs. 12.374-12.383, 2009.

**The relationship between saccadic suppression and perceptual stability.** T. L. Watson y B. Krekelberg en *Current Biology*, vol. 19, págs. 1040-1043, 2009.

**Updating of visual space across horizontal saccades in cerebellar and thalamic lesion patients.** J. Peterburs, B. Koch, K. P. Hoffmann et al. en *Cerebellum*, vol. 12, págs. 1-15, 2012.

**Intrasaccadic suppression is dominated by reduced detector gain.** J. Guez, A. P. Morris y B. Krekelberg en *Journal of vision*, vol. 19, n.º 8, págs. 1-11, 2013.

MENTE y CEREBRO
Revista de psicología y neurociencias

OFERTA DE SUSCRIPCIÓN

Reciba puntual y cómodamente los ejemplares en su domicilio

Suscríbase a *Mente y cerebro*...

- por **1 año** (6 ejemplares) y consiga un **23% de descuento** sobre el precio de portada (**30€** en lugar de 39€).
- por **2 años** (12 ejemplares) y obtenga un **29% de descuento** sobre el precio de portada (**55€** en lugar de 78€).

Y además podrá acceder de forma gratuita a la versión digital de los números correspondientes a su período de suscripción.

Puede suscribirse mediante:
**www.menteycerebro.es**
Teléfono: 934 143 344

# Imágenes en tres dimensiones

La creciente producción de largometrajes en 3D saca provecho del procedimiento que utiliza el cerebro para construir una imagen en relieve de los objetos. La diferencia de puntos de vista que llegan de cada ojo al encéfalo permite tal ilusión

ALAIN LIEURY

EN SÍNTESIS

### Visión con relieve

1 Un primer intento de llevar el efecto tridimensional al cine consistió en la superposición de dos imágenes de distinto color: los anaglifos.

2 La microelectrofisiología ha revelado que el curso de los dos nervios ópticos a través del cerebro son la clave de la visión tridimensional humana.

3 Las neuronas del cerebro analizan la disparidad entre las dos imágenes captadas por cada ojo y crean la imagen en tres dimensiones.

*Avatar*, la película de James Cameron, batió en 2010 los récords de taquilla de la historia del cine. Desde entonces, el fenómeno se ha extendido como una mancha de aceite y la industria del celuloide ha tomado buena nota: multitud de filmes se ruedan ya en relieve. También el Salón de la Electrónica en Las Vegas en enero de 2010 fue escenario de optimismo tras la crisis del año anterior gracias al renacer de la visión en tres dimensiones, el «3D».

Se trata del desenlace de una larga historia. Uno de los primeros intentos de llevar el 3D a la gran pantalla recuerdo que fue con la película *La extraña criatura del lago Negro*. ¡Todo un acontecimiento! Junto a la entrada, el espectador recibía unas gafas con un cristal rojo y otro cian (azul verdoso), las cuales debían producir un efecto de visión tridimensional. Dicha sensación, no obstante, no se apreciaba extraordinaria ni perduraba durante toda la película; además, el efecto de profundidad iba en detrimento de la calidad del color de las imágenes. ¿Por qué? Para comprenderlo, lo mejor es repasar los mecanismos de la percepción visual.

## Disparidad para crear profundidad

¿Cómo se origina el efecto de relieve? Los primeros científicos experimentales, indica Benjamin Bourdon en su libro *La percepción del espacio* (1902), insistieron en que la sensación de profundidad se debe sobre todo a la visión binocular. En fecha más reciente, los estudios microelectrofisiológicos han revelado el mecanismo exacto. El curso de los dos nervios ópticos a través del cerebro es la clave.

El trayecto de las vías visuales resulta complicado, ya que los dos nervios ópticos se cruzan antes de alcanzar la corteza visual. Las fibras ópticas que provienen de la mitad temporal (en dirección a la sien) de cada ojo se dirigen al hemisferio cerebral del mismo lado (por ejemplo, las del ojo izquierdo, al hemisferio cerebral izquierdo) mientras que las fibras ópticas del lado de la nariz se cruzan para ir al hemisferio contrario. La función de esta compleja anatomía ha sido un misterio durante mucho tiempo, sin embargo tiene una justificación sencilla. Imagine una lámpara situada a su diestra. La imagen de la lámpara se proyecta sobre el lado temporal de la retina del ojo izquierdo y, en consecuencia, las fibras ópticas transmiten la información al hemisferio izquierdo. En el ojo derecho sucede a la inversa: la imagen de la lámpara se proyecta sobre el lado nasal (junto a la nariz) del ojo derecho. En este caso, las fibras del lado nasal se hallan conectadas con el lado opuesto, es decir, con el hemisferio izquierdo. Por suerte: de este modo, al mirar un objeto, los dos ojos envían al mismo hemisferio dos imágenes de la misma escena.

¿Seguro que son idénticas? No está claro. Existe una pequeña diferencia a causa de la distancia

**EN RELIEVE**
Los personajes de *Avatar* sobresalen del vistoso fondo en el que se encuentran. Se trata de la primera película que recupera para el gran público la técnica 3D.

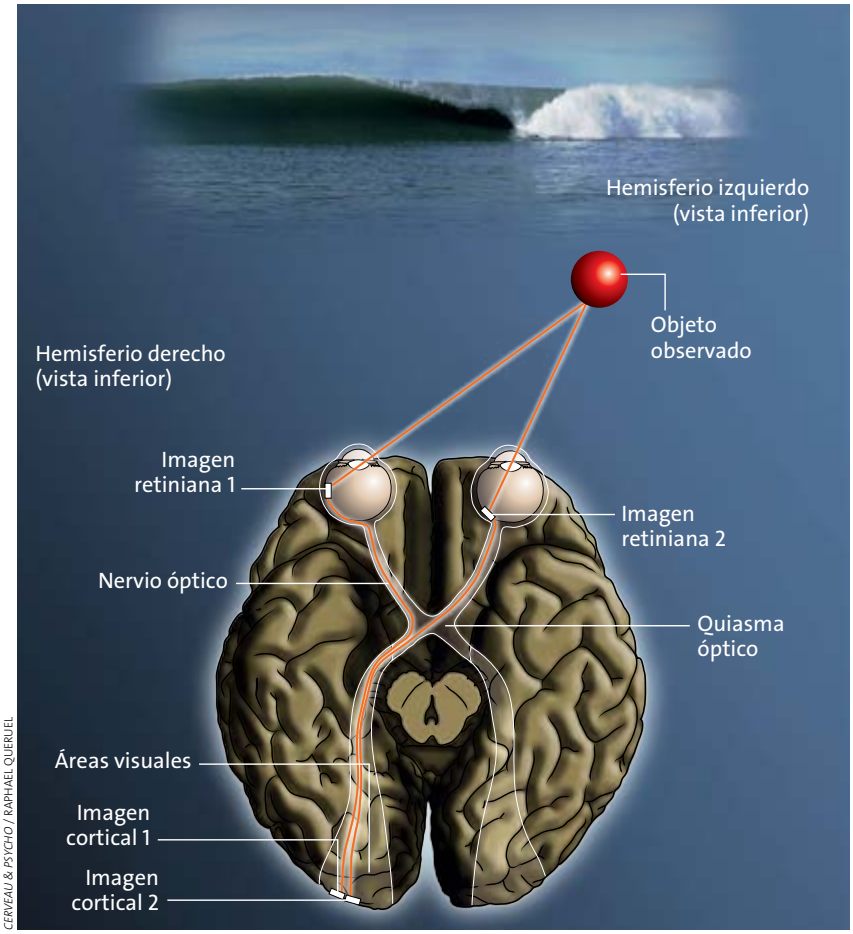
entre ambos ojos, unos 6,5 centímetros. Ello hace que ambas imágenes se superpongan en parte; el grado de superposición depende de la distancia a la que se encuentre el objeto (cuanto más cerca, más disímiles se perciben las imágenes). Mire de nuevo la lámpara, esta vez cierre uno y otro ojo de manera alterna: notará que el ojo derecho ve una imagen que se amplía hacia la derecha, mientras que el ojo izquierdo realiza el mismo efecto hacia la izquierda. Así, pues, el objeto se percibe «doble» pero con dos imágenes algo descentradas. Se trata de la disparidad binocular o retiniana.

Nuestro sistema visual construye la dimensión de profundidad según el grado de solapamiento de las dos imágenes de un mismo objeto que percibe cada ojo. Cuanto más cercano se halle un objeto menos se solaparán las dos imágenes que captan nuestros ojos.

¿Cómo crea el cerebro la percepción de profundidad a partir de la información binocular que recibe? Las neuronas presentes en diversas áreas corticales analizan la disparidad entre las dos imágenes, fenómeno que origina la producción de una imagen virtual en tres dimensiones. A gran distancia (de 30 a 40 metros) las dos imágenes se superponen por completo, por lo que el encéfalo no recibe información que le permita percibir la profundidad. Esa razón explica las dificultades en cuantificar las grandes distancias.

## Planteamientos técnicos

La percepción de una escena en relieve resulta, en definitiva, del cerebro que recibe dos imágenes de cada objeto y valora la profundidad en la que se sitúa dicho objeto en función del grado de coincidencia de las dos imágenes. De ahí que




CERVEAU & PSYCHO / RAPHAEL QUERUEL

**DISPARIDAD BINOCULAR**
Cuando el observador fija su mirada en un objeto situado a la izquierda, la imagen se percibe con un ángulo diferente por cada ojo: se proyecta más hacia la periferia a través del ojo derecho y más al centro en el caso del ojo izquierdo. Las dos imágenes retinianas se trasmiten al área visual de la corteza cerebral del hemisferio derecho (las imágenes que se proyectan en la retina cercana a la nariz son trasmitidas al hemisferio opuesto), donde dan lugar a dos imágenes mentales que se superponen parcialmente. El cerebro aprecia la distancia del objeto según el grado de superposición de las dos imágenes: cuanto más próximo se halle el objeto, más incompleta resulta la superposición.

para los medios cinematográficos o multimedia la proyección a cada ojo de una imagen ligeramente diferente de un objeto represente el principio que permite crear la ilusión de profundidad.

Desde las primeras investigaciones psicológicas a principios del siglo XX, una técnica de visión en relieve ha sido la estereoscopía [*véase* «Dos ojos, dos visiones», por Vilayanur S. Ramachandran y Diane Rogers-Ramachandran; *en este mismo número*]. El psicólogo Benjamin Bourdon (1860-1943) describe en una de sus obras un procedimiento empleado a mediados del siglo XIX por el inventor alemán Wilhelm Rollmann. Este procedimiento consiste en superponer una imagen roja y otra azul proyectándolas en una pantalla a través de lentes de los dos colores. Rollmann denominó a dichas imágenes anaglifos. La generalización de la técnica se introdujo en el cine durante los años cincuenta del siglo XX gracias a cámaras especiales dotadas de dos objetivos y dos filtros de color. La escena se filmaba con uno de los objetivos de la cámara estereoscópica en rojo, y con el otro, en verde (mejor dicho en cian, azul verdoso, auténtico color complementario del rojo). Los espectadores debían ponerse unas gafas especiales que se facilitaban en las salas de proyección y que contaban con una lente roja y la otra de tonalidad cian. De este modo cada ojo veía una imagen ligeramente diferente de la misma escena, lo que creaba una ilusión de profundidad.

El resultado, no obstante, fue escaso: solo daba una ligera impresión de relieve. Por otro lado, la sensación tridimensional iba en detrimento del color, lo que condujo a que el procedimiento tendiera a desaparecer. Sin embargo, con la llegada del cine de alta definición se retomó la idea con gran eficacia, caso del Futuroscope de Poitiers. Las películas habituales se basan en una proyección de 24 imágenes por segundo (en la televisión son 25) mientras que en los largometrajes en alta definición (como el Imax) se utiliza el doble de fotogramas, es decir, 48 imágenes por segundo. En el procedimiento del cine en relieve una cámara especial capta las escenas con dos objetivos, de manera que reproduce el enfoque de los dos ojos. Mientras que un objetivo dispone de un filtro de polarización vertical (que deja pasar, como si de

**ALTA TECNOLOGÍA PARA VER**
Las gafas polarizadas parecen sencillas, mas se basan en una física complicada.

CORTESÍA DE REAL D

un peine se tratara, solo los fotones que vibran en la dirección vertical), el otro cuenta con un filtro polarizador horizontal. Ambas imágenes se mezclan de modo que una de las dos (se proyectan 24 por segundo) presenta una polarización vertical, y la otra, horizontal.

El espectador luce unas gafas con cristales polarizados, uno no deja pasar más que la luz de polarización vertical y el otro solo permite el paso de la luz polarizada en sentido horizontal. De esta forma, el cerebro cree recibir la escena filmada como las imágenes captadas por los dos ojos en la realidad. El efecto es espectacular. Recuerdo una película de aviación, en la que se veía despegar un avión a la izquierda de la pantalla y literalmente «salir» de ella para colocarse como un objeto virtual entre la pantalla y el público. Numerosos espectadores, entre ellos yo mismo, tuvieron la impresión de que la proximidad era máxima. ¡Fue impresionante! La tecnología ha conseguido engañar al cerebro, produciéndole gran placer.

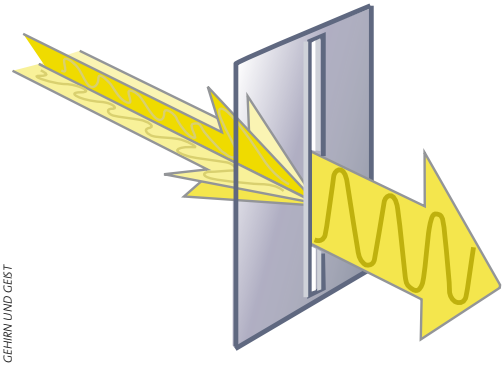
En el filme *Avatar* se ha utilizado una tercera técnica (existen otras) de visión alterna. Este método de última generación requiere gafas de cristal líquido; las imágenes son proyectadas a muy alta velocidad, 120 por segundo. La complejidad de las gafas es alta: poseen un receptor que activa, alternando, uno y otro cristal de manera que ciertas imágenes se perciben a través del cristal izquierdo y otras a través del derecho. En total existen 60 imágenes «izquierdas» y otras tantas «derechas», alternándose a una velocidad vertiginosa (60 veces por segundo) con objeto de engañar al cerebro, el cual funde las imágenes y proporciona al espectador una visión en relieve.

Aparte del uso lúdico en la industria cinematográfica, existen multitud de aplicaciones del 3D: en misiones militares, en robots para la exploración submarina o en intervenciones quirúrgicas a distancia, entre otras. Resulta fácil imaginarse también las ventajas que la técnica puede aportar para la manipulación precisa de un robot en circunstancias de aproximación que suponen un peligro para el ser humano, así como en la apreciación exacta del relieve y distancia entre objetos, incluidos aquellos que parecen inaccesibles. De hecho, los astrónomos de la NASA consiguieron en 2006 un logro hasta entonces impensable: lanzaron las dos sondas espaciales STEREO (por las siglas de *Solar Terrestrial Relations Observatory*), las cuales filmaron el medio estelar desde dos puntos de vista distintos. Dichas sondas han permitido obtener soberbias imágenes en relieve del Sol y las erupciones de su corona.

CORTESÍA DE PANASONIC

**GRABACIÓN POR DUPLICADO**
Una cámara digital capta la imagen con dos objetivos, de manera que permite reproducir el enfoque de los dos ojos de una persona.

**CUESTIÓN DE POLARIZACIÓN**
Mientras que un objetivo de la cámara dispone de un filtro de polarización vertical (solo permite pasar los fotones que vibran en la dirección vertical), el otro posee uno horizontal. El espectador capta las escenas a través de unas gafas con cristales polarizados.



GEHIRN UND GEIST

***Alain Lieury*** *es profesor emérito de psicología cognitiva de la Universidad de Rennes 2.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 49

## Para saber más

**The neurophisiology of binocular vision.** John P. Pettigrew en *Scientific American*, pág. 84, agosto de 1972.

**Le cerveau et la vision.** D. Hubel. Editions Pour La Science/Belin; París, 1994.

**Stereo vision requires an explicit encoding of vertical disparity.** I. Serrano-Pedraza y J. Read en *Journal of Vision*, vol. 9, n.º 4, págs. 1-13, 2009.

**The processing of three-dimensional shape from disparity in the human brain.** S. Georgieva et al. en *The Journal of Neuroscience*, vol. 29, n.º 3, págs. 727-742, 2009.

# Dos ojos, dos visiones

Cada uno de nuestros ojos percibe un mundo distinto, ello proporciona matices en la percepción de la profundidad

VILAYANUR S. RAMACHANDRAN Y DIANE ROGERS-RAMACHANDRAN

1

WIKIMEDIA COMMONS (*d*), *SCIENTIFIC AMERICAN MIND* (*b-g*)

**CON VOLUMEN**
Juguetes como el estereoscopio permiten disfrutar de la percepción del volumen que nos ofrecen nuestros ojos: cada uno capta una imagen por separado.

EN SÍNTESIS

## En estéreo

1 Se sabe que la disposición de los dos ojos en horizontal permite a los humanos percibir una imagen volumétrica. No obstante, el mecanismo subyacente continúa siendo un misterio.

2 Al parecer, el procesamiento de formas y la segmentación de la imagen acontece en nuestro cerebro antes de la visión en estéreo.

3 Las investigaciones de Helmholtz, Julesz, Pettigrew y Ramachandran constatan que el procesamiento visual de la estereopsis es más complejo de lo que se creía.

Los humanos gozamos de visión estereoscópica. Al tener los ojos separados horizontalmente, las imágenes que vemos a través de cada uno de ellos resultan algo diferentes entre sí, diferencia que a su vez es proporcional a la profundidad relativa (2). Las áreas visuales del cerebro miden dichas diferencias, resultado que experimentamos en la percepción del volumen y del que hemos disfrutado todos alguna vez de pequeños con juguetes estereoscópicos (1).

El procesamiento que convierte la imagen retinal en visión procede por etapas. Los rasgos rudimentarios (la orientación de bordes, la dirección de movimiento, el color, entre otros aspectos) se extraen en fases iniciales (regiones V1 y V2) antes de alcanzar las etapas siguientes en la jerarquía de procesamiento visual, el cual engendra de manera progresiva un análisis cada vez más refinado. Dicha descripción por etapas no es más que una caricatura; son muchas las vías que «vuelven» de una etapa a otra, proceso que permite que el cerebro practique una especie de juego de las 20 preguntas antes de llegar, tras iteraciones sucesivas, a una solución concreta.

De vuelta al concepto de la estereopsis, o visión volumétrica, puede surgir la pregunta, ¿en qué estadio acontece la comparación de las imágenes de los dos ojos? Si se mira una escena que contiene centenares de características, ¿cómo se sabe qué rasgo visto por un ojo casa con uno percibido por el otro ojo? ¿Cómo se evitan las falsas con-

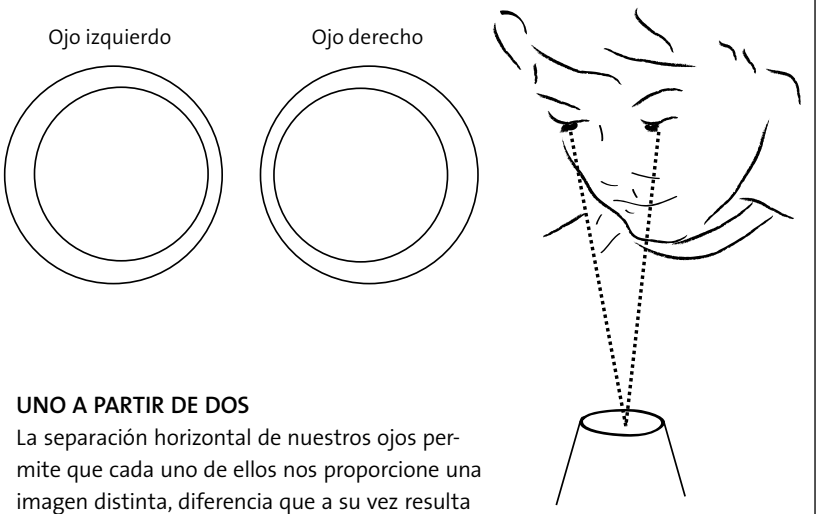
cordancias? Mientras no se logre la concordancia correcta, no resultará posible medir diferencias. Se trata del problema de la correspondencia.

## Cuestión de contornos

Hermann von Helmholtz, gran físico, oftalmólogo y fisiólogo decimonónico alemán, se preguntaba sobre el problema: ¿efectúa el celebro la comparación muy al principio, antes de que sean reconocibles los contornos de los objetos, o bien extrae por separado los contornos antes de compararlos? Helmholtz concluyó, aunque sin muchas pruebas, que la percepción de la forma de las siluetas correspondientes a cada ojo se produce antes de la comparación interocular. «La percepción monocular de formas precede a la estereopsis», afirmó, arguyendo que la tarea de comparar ambas imágenes de los respectivos ojos suponía una complejidad horrenda y se producía en un estadio muy avanzado del proceso de visión. Según Helmholtz, para resolver el problema de la correspondencia, el encéfalo primero reconoce las formas, para luego comparar los perfiles planos de dichas formas. La estrategia permite al cerebro evitar (o reducir al mínimo) las falsas concordancias.

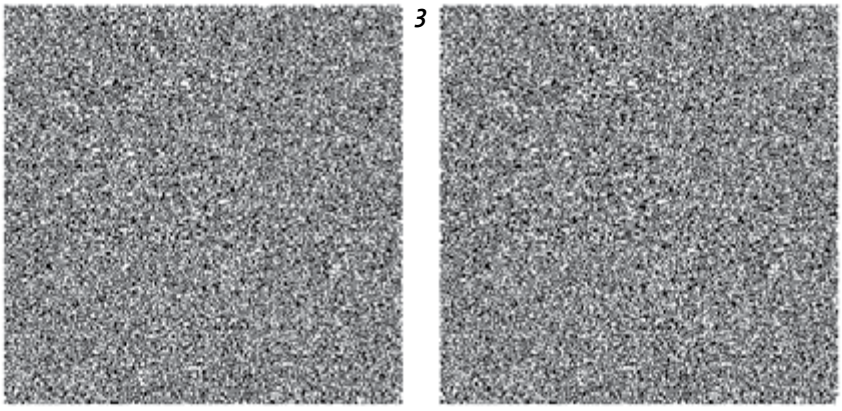
Casi cien años después, Béla Julesz, científico ya fallecido y por otro lado personaje de escasa modestia y genialidad sin par, puso en tela de juicio la idea de Helmholtz mientras trabajaba en los Laboratorios Bell. Julesz se valió de un estereograma diferente (3), para el cual utilizó configuraciones de gruesos puntos generados por ordenador al azar en lugar de las fotografías o los dibujos lineales. De tal manera, ni en la imagen del ojo derecho ni en la del izquierdo aparecía ningún contorno o forma reconocible. Pese a que los puntos de la imagen se obtuvieron mediante ordenador (como se esquematiza en 4), puede comprenderse el principio utilizando una cámara digital e imágenes de puntos distribuidos de forma casual. Se parte de un motivo aleatorio de puntos sobre un cuadrado de unos cinco centímetros de lado. Por otro lado, se recorta con unas tijeras un cuadrado de un centímetro con otro motivo aleatorio, al que llamaremos C, de «cuadrado». Se centra este cuadrado sobre la primera configuración y se toma una fotografía para preparar la imagen del ojo izquierdo . Si C se encuentra situado en la posición correcta, resultará prácticamente invisible debido al camuflaje de los puntos de fondo. Ahora se desplaza C horizontalmente un poco hacia la derecha (situándolo

*2*




**UNO A PARTIR DE DOS**
La separación horizontal de nuestros ojos permite que cada uno de ellos nos proporcione una imagen distinta, diferencia que a su vez resulta proporcional a la profundad relativa.

*3*

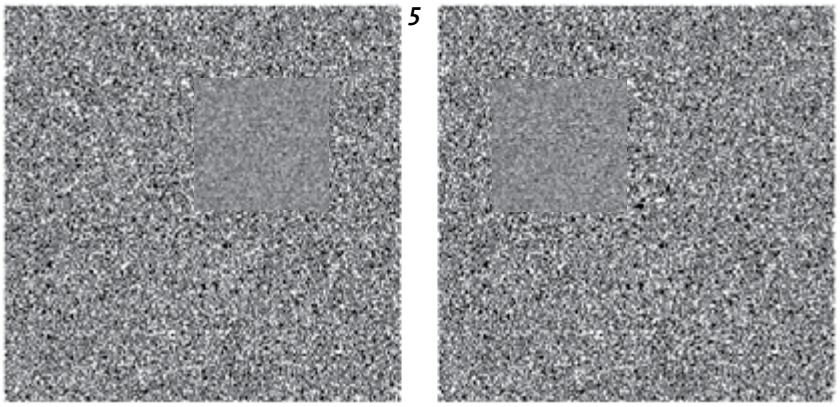


*4*

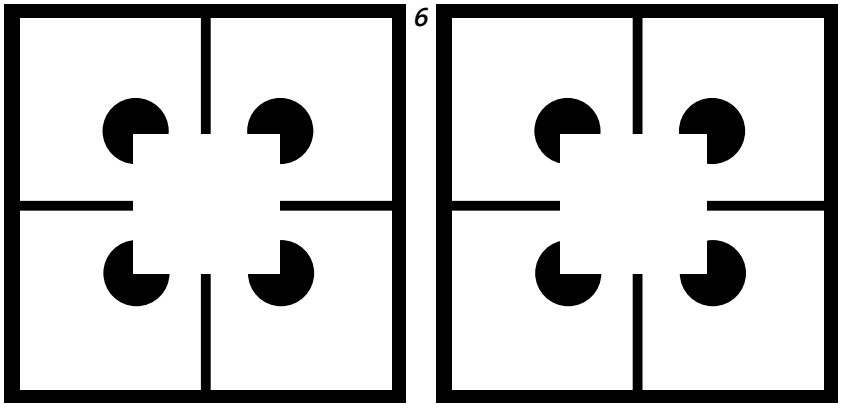
| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | A | A | B | B | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | B | A | B | A | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | A | A | B | A | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | B | B | A | B | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | Y | A | A | B | B | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | X | B | A | B | A | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | X | A | A | B | A | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | Y | B | B | A | B | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

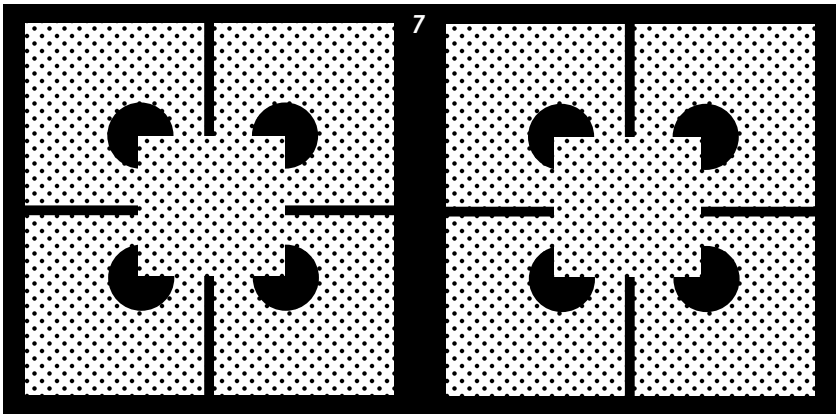
**TEORÍAS DISPARES**
Béla Julesz usó un esterograma (3) formado por puntos, los cuales obtuvo por ordenador (4). De esta manera ponía en tela de juicio la conclusión de Hermann von Helmhotz de que la forma de las siluetas de cada ojo antecede a la comparación interocular.



5



6



7

**ILUSIONES REVELADORAS**

Según Julesz, la concordancia en estéreo se debe al desplazamiento «punto por punto» (5). No obstante, los contornos ilusorios (6 y 7) de Ramachandran creados a partir de «comecocos», también puntos, revelan que el procesamiento de formas y la segmentación de la imagen se dan antes que la visión en estéreo.

de modo que no se aprecie desde el cuadrado pequeño ningún contorno por una superposición de puntos). Se toma otra fotografía correspondiente a la imagen al ojo derecho.

Julesz presentó a cada ojo solo una imagen de su estereograma de puntos aleatorios; observó con asombro que un cuadrado pequeño destacaba y flotaba de forma tan real que casi sintió la tentación de asirlo, a pesar de que ningún cuadrado fuese visible para ninguno de los dos ojos. El experimento original se realizó con píxeles generados a través de medios digitales, no con trocitos de papel, por lo que el desplazamiento contó con una precisión digital. Así que no se trata de que haya un cuadrado *oculto* en la imagen que recibe cada ojo; matemáticamente, ni siquiera *existe* en cada ojo por sí solo. Se define exclusivamente por la *diferencia*; el desplazamiento horizontal de C (*véase la columna de las X y las Y en 4*). Julesz llegó a la conclusión de que Helmholtz se equivocaba. Dado que el cuadrado emerge tan solo a resultas de una fusión estereoscópica, la concordancia en estéreo tiene que consistir en una medida del desplazamiento «punto a punto» (o «píxel a píxel»); el perfil del cuadrado aflora solo a partir de esta comparación. La apreciación del volumen precede a la detección de forma (en este contexto debe entenderse «forma» de modo intercambiable con perfiles y contornos generalizados).

La demostración de Julesz inspiró a Jack Pettigrew, por entonces un joven estudiante de medicina en la Universidad de California en Berkeley, a examinar la fisiología de las neuronas binoculares en la etapa más temprana del procesamiento binocular. Hasta entonces, el problema de la visión estereoscópica parecía intratable: si Helmholtz estuviera en lo cierto, los investigadores tendrían que habérselas primero con la fisiología de la percepción de formas, problema que nadie sabía abordar. Pettigrew descubrió, sin embargo, que su corazonada era correcta: esas células estaban extrayendo los desplazamientos horizontales y señalando la estereovisión.

Esta sencilla historia se complicó cuando un estudiante venido de India (Ramachandran) descubrió que, en ciertas circunstancias, la percepción de la forma precedía a la visión «en estéreo», lo que revelaba la versatilidad de los centros visuales del cerebro. Ramachandran creó un estereograma que poseía para cada ojo un cuadrado definido por textura. Entonces desplazó el cuadrado entero en lugar de desplazar los puntos que definían las texturas (5).

Tenía dos motivos puntuales aleatorios, uno en cada ojo. Pero esta vez hay un cuadrado individualmente visible en cada ojo, a diferencia de los motivos de Julesz. Sigue estando formado todavía por puntos repartidos al azar, pero a causa de la diferencia en textura, hay un cuadrado visible

de forma individual en cada ojo. Los puntos que constituyen la imagen del ojo izquierdo (incluido C) son completamente *distintos* en los dos ojos; a diferencia de las figuras de Julesz, no tienen correlación mutua. Este estereograma es el recíproco del de Julesz: existe un cuadrado visible en cada ojo, pero los puntos que lo constituyen (y su fondo) se encuentran sin relación en los dos ojos.

Ramachandran observó que al examinar esta imagen a través de un estereoscopio, el cuadrado central aparecía en altorrelieve. Dado que los puntos que definen los cuadrados carecían de correlación en los dos ojos, sus colegas y él concluyeron que, en este caso, la percepción de la forma era anterior a la percepción de profundidad. El cuadrado era reconocido por separado en cada ojo antes de que fuera medido su desplazamiento. La regla de Julesz podría resultar infringida. El cerebro se vale de muchas astucias para lograr un mismo fin. En un ambiente «ruidoso» camuflado, es razonable que se apliquen ambas estrategias.

La segunda presentación inventada por él confirma esta misma tesis. Se aprovecha de un curioso efecto visual denominado «contornos ilusorios» (6). Se han hecho cuatro «comecocos» (*pacmen*) con sendos discos negros a los que se les ha recortado un cuadrante. Pero lo que se ve no son comecocos situados unos frente a otros: lo que se percibe es un cuadrado blanco, opaco e ilusorio, que cubre parcialmente a cuatro discos negros situados más al fondo. El cerebro se plantea «¿Cuál es la probabilidad de que un científico malvado haya alineado estos discos de esta forma precisa? Lo más probable es que se trate de un cuadrado opaco, y eso es lo que voy a ver». Los lados del cuadrado son una alucinación, llamada segmentación de imagen.

¿Pueden dichos lados ilusorios inducir una visión en profundidad? Comencemos con la figura correspondiente al ojo izquierdo en 6 y desplacemos el cuadrado ilusorio hacia la izquierda con el fin de crear la imagen correspondiente al ojo derecho. (Tal corrimiento supone tomar raciones mayores del disco.) Al observar las imágenes a través de un visor... ¡Zas! ¡El cuadrado ilusorio flota! Lo mismo que antes, el procesamiento de formas y la segmentación de la imagen se da antes que la visión en estéreo.

Todavía se puede mejorar. Tomemos una plantilla de este estereograma y peguémosla sobre un fondo creado por repetición de columnas de puntos (7). Los puntos son idénticos en los dos ojos: no aportan información de disparidad. Mas, sorprendentemente, los puntos situados en el interior del ilusorio cuadrado flotan juntamente con él, ilusión que llamamos captura de estéreo; los puntos son capturados por el cuadrado ilusorio y llevados hacia delante, a pesar de que ellos mismos no han sufrido ningún desplazamiento.

Tal resultado hace pensar que la tesis de Julesz no era correcta del todo: la estereopsis entraña más que la mera comparación de píxeles a través de los dos ojos. Incluso si se consideran las células de disparidad de Pettigrew, es forzoso que estén extrayendo diminutas agrupaciones de puntos orientados (no puntos individuales) y «buscando» grupos idénticos que casen. Pero los experimentos de Ramachandran (también otros resultados muy parecidos del psicólogo Lloyd Kaufman, de la Universidad de Nueva York) han permitido ver que el mecanismo era todavía más complejo: la imagen podría resultar segmentada por oclusión implícita y crear contornos ilusorios que sirvan de hitos para la concordancia estereoscópica. Una vez que esta información ha sido extraída y medida la disparidad, el cerebro construye una superficie ilusoria en el espacio. El hecho de que los puntos incluidos sean proyectados hacia delante implica que la superficie es retroalimentada y aplicada a los puntos.

Así pues, podemos concluir que Helmholtz, Julesz, Pettigrew y Ramachandran están en lo cierto: el procesamiento visual de la estereopsis es más complejo de lo que pensábamos. No tenemos ni atisbos de los mecanismos fisiológicos subyacentes a dichas interacciones. Las neuronas detectoras de disparidades se encuentran en V1 (como fue demostrado por Pettigrew), pero las encargadas de la extracción de contornos ilusorios (de la oclusión implícita) residen en la región V2, el siguiente estadio en sentido ascendente, como demostró Rudiger von der Heydt, de la Universidad Johns Hopkins. Estos descubrimientos implican que ha de producirse una retroalimentación de mensajes desde V2 hacia V1 con el fin de modular el procesamiento de rasgos más pequeños. Tal idea no se ha comprobado todavía.

***Vilayanur S. Ramachandran*** *y* ***Diane Rogers-Ramachandran*** *investigan en el Centro para el Cerebro y la Cognición en la Universidad de California en San Diego.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 48

## Para saber más

**Fundations of cyclopean perception.** Béla Julesz. University of Chicago Press, 1971. (Edición MIT Press, 2006.)

**The role of contours in stereopsis.** V. S. Ramachandran, V. Madhusudhan Rao y T. R. Vidyasagar en *Nature*, vol. 242, págs. 412-414, 1973.

**Capture of stereopsis and apparent motion by illusory contours.** V. S. Ramachandran en *Perception and Psychophysics*, vol. 39, n.º 5, págs. 361-373, 1986.

**Seeing in depth: vol. 1: basic mechanics y vol. 2: depth perception.** Ian P. Howard y Brian J. Rogers. Oxford University Press, 2008.

# La importancia de los espacios vacíos

Cuando miramos, nos parece que recibimos una corriente ininterrumpida de estímulos. Falsa creencia. Nuestra atención visual no es continua. Como una videocámara, toma una imagen diez veces por segundo

ISABELLE BAREITHER

EN SÍNTESIS

**Click**

1 La percepción de estímulos luminosos y de movimiento es discontinua. Funciona como una cámara de grabación.

2 Este fenómeno solo se produce cuando observamos objetos con atención.

3 Ello explica la ilusión óptica de los radios de una rueda: cuando un vehículo nos adelanta a partir de una determinada velocidad, nos parece que sus llantas giran hacia atrás.

John Wayne, el icono de los westerns de Hollywood, gozaba de la reputación de ser el más rápido; demasiado para los bandidos comunes y a menudo también para las cámaras de cine. Cuando conducía la diligencia a galope por las praderas del oeste cinematográfico, los radios de las ruedas giraban cada vez más deprisa. Pero, de repente, parecían quedarse inmóviles, incluso empezaban a retroceder a ojos del espectador.

La ilusión óptica en la apariencia de los radios de una rueda se produce cuando la toma secuencial de imágenes de una película coincide con el paso de los radios de las ruedas. La velocidad normal de una grabación cinematográfica es de 24 imágenes por segundo. Si la rueda se mueve tan rápido que entre instantánea e instantánea el radio siguiente coincide con la ubicación del anterior en la toma precedente, parece que se queda quieta. Vemos ruedas que giran hacia atrás cuando los radios se desplazan constante y ligeramente en sentido antihorario. Nuestra percepción funciona entonces según la regla del «siguiente vecino» y reconstruye el movimiento de acuerdo al radio más cercano, respectivamente.

Esta ilusión no solo aparece en los filmes. También fuera del celuloide se producen situaciones en las que aparece un «efecto rueda de carro»: en los aeropuertos, cuando un helicóptero se dispone para despegar; o en la autopista, cuando nos adelanta un vehículo cuyas llantas parece que giran hacia atrás.

Este efecto inspiró la idea de que el cerebro humano funciona de manera similar a una cámara cinematográfica, es decir, considera solo una rápida secuencia de imágenes que percibimos como un continuo. El ganador del premio Nobel Francis Crick, junto con el biólogo experto en ciencia del comportamiento Christof Koch propusieron en 2003 que nuestra atención consciente se forma a partir de «una serie de tomas instantáneas» y el movimiento se recrea en torno a dichas imágenes [*véase* «La sucesión de imágenes mentales», por Christof Koch; MENTE Y CEREBRO n.º 13, 2005]. De

forma similar a los libros que se usaban en el cine de dedo, en los que las páginas se pasan rápidamente para generar la percepción de figuras en movimiento a través de dibujos independientes.

Una serie de investigaciones dieron validez empírica a dicha hipótesis. Lo más complicado fue relacionar con exactitud la percepción subjetiva, como es la vivencia de una ilusión óptica, con los procesos cerebrales asociados. Para tal fin, se utilizó el electroencefalograma (EEG), técnica de formación de imágenes del cerebro que registra informaciones de la actividad neuronal con una alta resolución temporal.

Unos electrodos pegados al cráneo del probando captan las señales eléctricas de las neuronas. Cuando los investigadores analizan a posteriori las señales registradas, centran su atención en dos aspectos fundamentales: por un lado, en la variación de las corrientes cerebrales ante un estímulo (potenciales relacionados con eventos); por otro, en las fluctuaciones rítmicas de fondo, las cuales no se producen como reacción ante un determinado estímulo, sino que reflejan el nivel general de excitación de las células neuronales.

## Al ritmo del cerebro

Cuando nos encontramos despiertos y con los ojos cerrados, el EEG registra sobre todo ondas alfa, que oscilan de siete a trece veces por segundo. En cambio, cuando soñamos despiertos o entramos en un sueño ligero, predominan las ondas theta, cuya frecuencia es de cuatro a siete oscilaciones por segundo. Ahora bien, ¿permite el electroencefalograma constatar que nuestro sistema visual funciona como una cámara?

Para comprobarlo, una posibilidad estriba en registrar las corrientes neuronales de los probandos cuando se encuentran sometidos a estímulos umbral, esto es, aquellos que reciben en ese preciso instante, aunque a veces escapan a la percepción. Un equipo dirigido por Niko Busch, del Hospital Clínico Universitario de la Charité de Berlín, reveló en 2009 el modo en que las corrientes cerebrales influían en las impresiones sensoriales.

En primer lugar, los investigadores mostraron a los participantes destellos de luz de luminosidad dispar sobre una pantalla negra. De este modo determinaron el umbral de percepción individual de cada voluntario, es decir, la claridad de la luz que percibían en el 50 por ciento de las ocasiones. A continuación, presentaron al probando nada menos que 1500 estímulos umbral, y registraron las corrientes cerebrales generadas. Tras cada uno de los destellos, los sujetos respondían si habían percibido el estímulo o no. Para desenmascarar posibles «tramposos», se llevaron a cabo 300 rondas sin destellos luminosos.

El mero hecho de que existan estímulos umbral que a veces percibimos y otras no, indica que nuestro sistema visual se encuentra sometido a ciertas oscilaciones. Busch y sus colegas relacionaron estas irregularidades con las ondas alfa registradas en el EEG. Según hallaron, la experiencia de la persona variaba en función del ritmo que presentaban las ondas alfa poco antes del destello de luz; si, por ejemplo, había alcanzado una cresta, un valle o un punto intermedio.

Nuestra percepción, por lo menos en el caso de los destellos luminosos, fluctúa en forma de ondas. Fases de sensibilidad óptima se combinan varias veces por segundo con fases de mayor inhibición sensorial.

Pero observación no es igual a atención. Podemos ver un objeto porque aparece en nuestro campo visual o porque le prestamos atención. El equipo de Rufin VanRullen, de la Universidad de Toulouse, demostró en 2005 que esta diferen-

EN BREVE

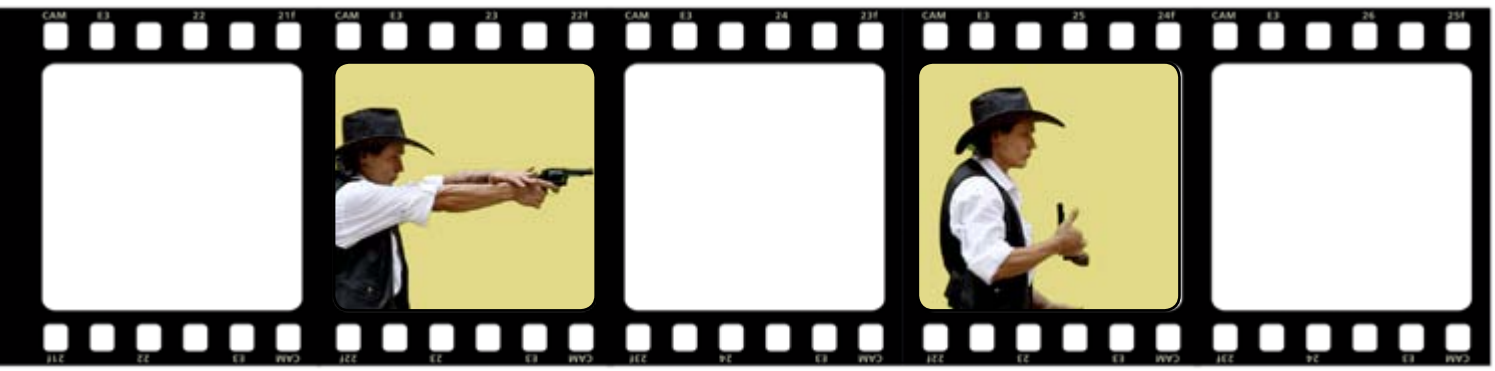
**Potencial relacionado con un evento:** típica señal dentro del patrón de actividad neuronal producida como reacción a un estímulo externo o interno.

**Frecuencia:** frecuencia de oscilación de las ondas por unidad de tiempo.

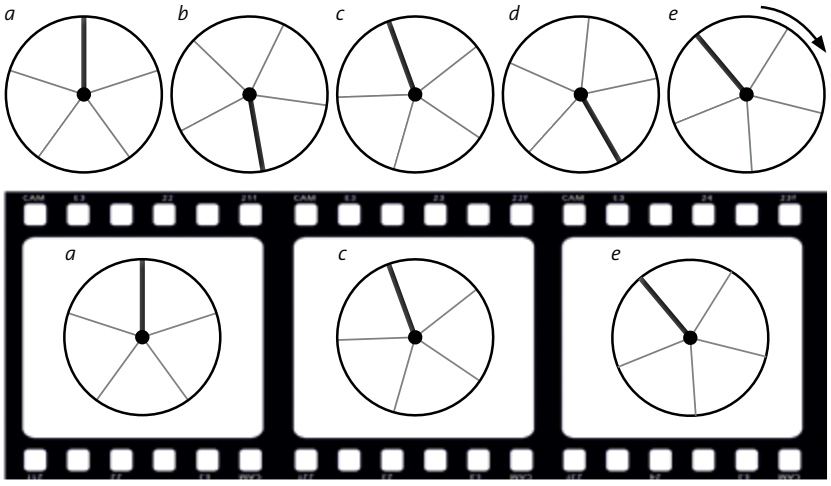
**Amplitud:** altura de los picos y valles de una onda.

**Fase:** lugar en el que se encuentra el recorrido de una onda en un momento determinado.

**CINTA PERFORADA**
Nuestra atención consciente realiza una nueva toma instantánea cada décima de segundo, alrededor de la mitad de la frecuencia que una cámara de grabación de vídeo.



FOTOLIA / INSTANTLY (*película*); FOTOLIA / KAMILOPAFILMS (*fotogramas*)




GEHIRN UND GEIST

**SENTIDO CONTRARIO**
Las cámaras de grabación registran 24 imágenes por segundo. Si una rueda gira tan rápido que un radio (*en negrita*) aparece en cada fotograma ligeramente desplazado en contra del sentido de las agujas del reloj (*debajo*), se produce el efecto de la ilusión de la apariencia de los radios de una rueda. El cerebro reconstruye el movimiento según la regla del «siguiente vecino», tomando la menor variación de movimiento posible. Los fotogramas de la videocámara sugieren una lenta rotación en el sentido opuesto.

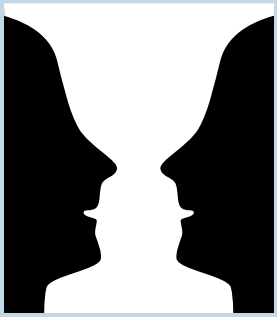
cia adquiere una importancia capital en el caso de la apariencia de los radios de una rueda. Esta ilusión se percibe con mayor intensidad cuando se observa la rueda de forma consciente. En cambio, a menudo se disipa si se desplaza el foco de atención ligeramente hacia delante. Ello explica, entre otros fenómenos, por qué la ilusión óptica que producen los radios de una rueda real a menudo no resulta tan estable como la que se origina en las películas: un mínimo movimiento de ojos basta para cambiar la dirección aparente de rotación.

¿Es posible que la percepción en un estado de concentración plena dependa solo del ritmo alfa que muestra el EEG? Busch y VanRullen indagaron tal posibilidad en 2010. Mostraron a los probandos puntos luminosos situados en su respectivo umbral de la percepción y analizaron sus electroencefalogramas. Una pequeña flecha indicaba a los voluntarios el lado de la pantalla por el que aparecería el estímulo luminoso.

Sin embargo, los destellos no solo aparecían por el área señalada; a menudo surgían por el otro lado. Como cabía esperar, los sujetos obtuvieron mejores resultados en la percepción de los destellos de luz que ya aguardaban, pues eran foco de su atención. Pero también se observó una diferencia decisiva en sus ondas cerebrales: aunque la detección del estímulo cuando surgía el lado «incorrecto» no dependía de las ondas alfa, en cambio, si se producía por el lado esperado, la percepción fluctuaba de nuevo con el ritmo de fondo de las ondas cerebrales.

«La atención no se produce en cualquier momento, sino solo cuando las ondas cerebrales se encuentran en la fase adecuada de la oscilación», resume Busch. Y añade: «Las ondas del ritmo alfa parecen fraccionar nuestra atención en tomas instantáneas, del mismo modo que una cámara capta las imágenes. El cerebro realiza un nuevo disparo cada décima de segundo». Se sabe desde hace tiempo que nuestra atención consciente no puede dirigirse a varios objetos del entorno de forma simultánea; por el contrario, debe focalizarse en los diferentes objetos de manera secuencial. Además, nuestro foco de visión se modifica continuamente cuando observamos un único objeto.

Busch y su equipo intentan averiguar qué sentido puede tener que, en dicha situación, el cerebro active y desactive su atención. La explicación más plausible sugiere que se trata de una forma de



GEHIRN UND GEIST

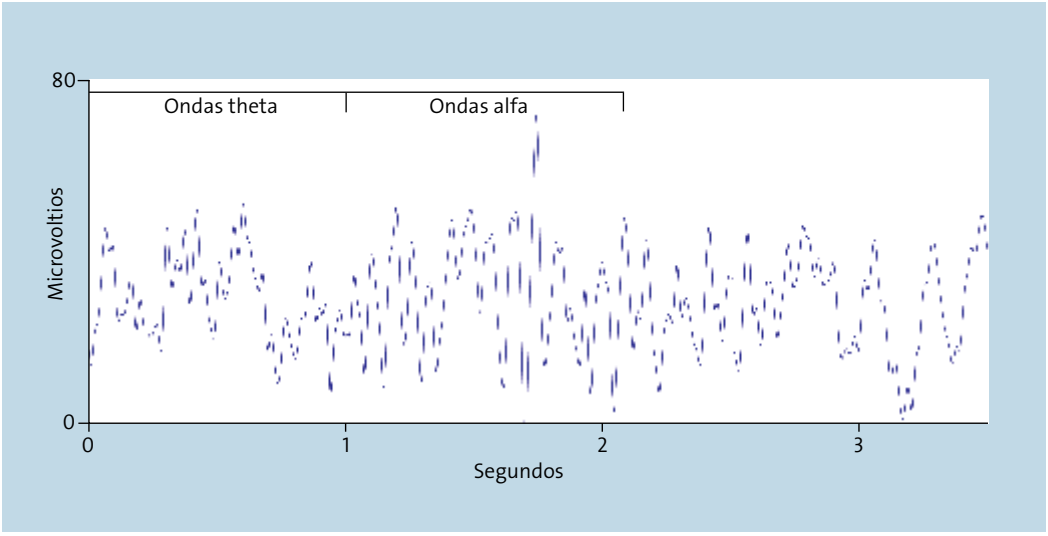
**ALTERNANCIA**
En esta ilustración pueden observarse o bien un cáliz o bien dos caras.

## ¿Cáliz o rostros?

**La situación en la que se encuentra nuestro cerebro en un momento concreto** determina cuándo percibimos algo y lo que vemos, según demostraron Guido Hesselmann y sus colegas en 2008. En su experimento midieron la actividad neuronal mediante tomografía por resonancia magnética funcional (TRMf), registrando las variaciones del flujo sanguíneo en el cerebro. Observaron que la actividad «de fondo» del cerebro determinaba si los probandos percibían en el dibujo un cáliz o bien dos rostros de manera alterna.

Los investigadores mostraban, de forma reiterada, imágenes similares a las de la izquierda a los sujetos que yacían en el tubo del escáner. Tras cada pasada, los voluntarios debían indicar qué habían visto. Como la presentación siempre era fugaz, solo tenían tiempo para ver o bien el cáliz o bien los rostros. Percibían preferentemente los rostros cuando justo antes de la presentación de la imagen, el giro fusiforme (área del lóbulo temporal) reflejaba actividad. Los investigadores especulan que dicha área podría haber sido activada previamente por la proyección mental de caras.

«Spontaneous local variations in ongoing neural activity bias perceptual decisions», por G. Hesselmann et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, págs. 10.984-10.989, 2008.)




ISABELLE BAREITHER

**CAMBIO DE RITMO**
El electroencefalograma de la autora oscila primero con el lento ritmo de las ondas theta (las pequeñas ondas intermedias deben omitirse). Aproximadamente un segundo después, las ondas cerebrales se transforman en ondas alfa, con oscilaciones más rápidas, necesarias para percibir la ilusión de la apariencia de los radios de la rueda. Transcurrido otro segundo, las ondas theta vuelven, de manera paulatina, a predominar.

economizar recursos. Es probable que el cerebro se muestre prudente a la hora de utilizar el costoso recurso de la atención.

## El resto se «rellena»

Sírvanos el ejemplo de un semáforo para entender el proceso. Un automovilista frena, pues el sistema visual de su cerebro ha detectado la luz roja del semáforo. Al cabo de unos segundos, el disco cambia a verde. ¿Cómo sabe el cerebro que entre ambos sucesos el semáforo siempre ha estado en rojo?

Una teoría explica que el sistema visual solo detecta el cambio de rojo a verde; el espacio temporal intermedio simplemente lo «rellena» con la percepción del rojo. En cierto modo, nuestra visión trabaja a veces con este método, por ejemplo, para compensar la zona ciega de la retina (zona retiniana carente de terminaciones nerviosas visuales). Por lo general, nuestra percepción debería mostrar una zona oscura de 15 grados a los lados del punto que observamos. Sin embargo, las informaciones del entorno que capta el resto del sistema sensorial cubren con tal efectividad la mancha ciega que ni siquiera percibimos el fenómeno.

Si aplicamos este mismo principio al ejemplo del semáforo, resulta posible que nuestro sistema visual reaccione solo ante variaciones, por lo que «rellenaría» el lapso de tiempo intermedio con la percepción del rojo. Y una observación continua no aportaría nuevas informaciones mientras el semáforo permaneciera en rojo. Dado que las fases del semáforo son relativamente largas y nuestro entorno no se transforma radicalmente en una centésima de segundo, la observación y el registro continuos serían, desde el punto de los recursos neuronales, un dispendio ineficiente.

Busch aclara: «Nuestros resultados apuntan a la hipótesis de que el sistema neuronal funciona usando un método intermedio entre ambos extremos. No observa de forma permanente una señal invariable, pero tampoco se limita a reaccionar ante cambios del entorno. En lugar de ello, realiza periódicamente una toma instantánea, cada docena de milisegundo».

De todas formas, no parece que cada una de las instantáneas funcione igual de bien, puesto que tanto los estudios sobre estímulos umbral como los trabajos de VanRullen y Koch sobre la ilusión de la rueda de carro indican que la atención también depende de la amplitud (altura) de la onda alfa: si, al observar una rueda girando, las ondas son más bajas, la ilusión tendrá un efecto permanente; si la amplitud aumenta, el engaño tiende a desaparecer.

La actividad neuronal que produce el ritmo alpha se encuentra relacionada de múltiples formas con la atención a los estímulos del entorno. El hecho de que se fraccione en tomas instantáneas constituye un proceso bastante específico, puesto que otros fenómenos en el cerebro ocurren posiblemente de forma no secuencial. Los sistemas de alerta que nos advierten de peligros registran más bien una sucesión de imágenes continua.

***Isabelle Bareither*** *es psicóloga y realiza el doctorado en la Universidad de Humboldt en Berlín dentro del equipo de investigación de Niko Busch.*

### Para saber más

**A framework for consciousness.** F. Crick y C. Koch en *Nature Neuroscience*, vol. 6, págs. 119-126, 2003.

**The phase of ongoing EEG oscillations predicts visual perception.** N. Busch et al. en *The Journal of Neuroscience*, vol. 29, págs. 7869-7876, 2009.

**Spontaneous EEG oscillations reveal periodic sampling of visual attention.** N. Busch y R. VanRullen en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 107, págs. 16.048-16.053, 2010.

# Ruido, ruido, ruido

En la oficina, en la calle, incluso en clase. Hoy en día, el ruido resulta casi omnipresente. ¿Cómo combatir sus efectos nocivos?

JÜRGEN HELLBRÜCK, SABINE SCHLITTMEIER Y MARIA KLATTE

El ruido no es un invento reciente. Ya en la antigua Roma, el bullicio y el alboroto eran el pan de cada día. Según el poeta romano Décimo Junio Juvenal (aprox. 100 d.C.), el nivel de ruido que se producía en su ciudad podría mantener en vilo hasta a un «druso» (el emperador romano Claudio Druso era conocido por su sueño profundo). Juvenal relata asimismo que muchos ciudadanos padecían insomnio; a algunos les afectaba de tal forma que hasta morían de ello.

El estoico Séneca (aprox. 1-65 d.C.) distinguió varios tipos de cargas auditivas. Entre ellas, consideraba sobre todo molestas las voces. A tenor de su descripción, estas actúan directamente sobre el alma, mientras otra clase de ruido solo «golpea» nuestro oído y lo «llena». También la música es, en su opinión, una fuente de distracción mayor que cualquier sonido monótono.

¿Es eso cierto? ¿Penetran las voces y la música irremediablemente en la consciencia, donde destruyen los pensamientos, como se lamentaba el filósofo Schopenhauer (1788-1860)?

Quien esté harto de las constantes conversaciones por teléfono móvil y la música de fondo en tiendas o calles peatonales, probablemente le dará la razón. El ruido tiene múltiples efectos. Aparte de interferir en la comunicación, puede afectar a nivel emocional y físico: aumenta la tensión y causa problemas cardiovasculares a largo plazo. Algunos experimentos psicológicos revelan, además, que ciertos ruidos influyen de forma negativa en el rendimiento intelectual.

En los años ochenta del siglo XX, Alan Baddeley, por entonces en la unidad de psicología aplicada del Consejo de Investigación Médica en Cambridge, y Pierre Salamé, en los laboratorios de fisiología y psicología ambiental del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia, introdujeron este

aspecto cognitivo por primera vez en su investigación sobre los efectos del ruido. Descubrieron que el murmullo influía sobre la memoria verbal a corto plazo; incluso si no se prestaba atención a su contenido o si las voces hablaban en un idioma desconocido para el oyente. Baddeley había concebido, pocos años antes, un modelo de memoria de trabajo basado en una memoria a corto plazo que retiene informaciones durante unos instantes [*véase* «Recuerdos efímeros», por Christian Wolf; Mente y cerebro n.º 42, 2010] a la par que determina qué contenido resulta consciente para la persona en ese momento. Dicho proceso parece especialmente sensible a las voces de fondo.

Baddeley bautizó uno de los componentes destacados de su modelo como «bucle fonológico». Este concepto puede imaginarse como una especie de cinta de grabación que registra el contenido fonético que penetra en los oídos (por ejemplo, un número de teléfono), que se acaba grabando a base de repeticiones internas continuas. Un sencillo experimento muestra cuán sensible resulta

**HASTA QUE SILBEN LOS OÍDOS**
El ruido cotidiano, además de resultar molesto, perjudica el sistema cardiovascular y afecta a la memoria a corto plazo.

DREAMSTIME / JONATHAN ROSS

EN SÍNTESIS

## Fracaso estrepitoso

1 El ruido afecta al rendimiento intelectual, sobre todo a la memoria a corto plazo. Las voces y otros ruidos discontinuos resultan en especial perjudiciales.

2 Por lo general, si se filtran las frecuencias agudas del murmullo de fondo, mejora la capacidad de memorización.

3 Las aulas en las que resuena la voz y predomina el ruido de fondo dificultan la comprensión y el aprendizaje a los escolares. Los materiales que absorben el sonido pueden remediar la situación.

esta grabación a corto plazo. En una pantalla de ordenador se muestra una serie de cifras a los probandos para que las memoricen. A continuación, se les solicita que reproduzcan los números en el orden correcto. Los aciertos informan sobre la amplitud de memoria de cada individuo. En otro momento del ensayo, se colocan unos auriculares a los participantes; a través de ellos escuchan un murmullo cuyo contenido resulta intrascendente para la tarea que les compete (se oyen datos obsoletos sobre el estado de la bolsa). El rendimiento de los probandos disminuye de manera notable. En concreto, su tasa de error asciende hasta un 30 por ciento.

Se puede afirmar, pues, que incluso los contenidos fonéticos insignificantes distraen la atención, de manera que empeoran el rendimiento cognitivo. Estudios posteriores han constatado que un idioma extranjero desconocido o incluso una frase reproducida al revés reduce la capacidad de memorización del sujeto.

### A costa de la memoria

Al contrario de lo que pueda pensarse, más que de un problema de percepción o de atención se trata de un fenómeno de la memoria. De hecho, cuando se solicita a los probandos que lleven a cabo ejercicios en los que no se requiere una retentiva especial, parecen inmunes a cualquier estímulo fonético irrelevante.

Asimismo, se ha demostrado que las personas pueden acostumbrarse a un murmullo de fondo. El volumen tampoco parece desempeñar un papel relevante, eso sí, mientras oscile entre los 40 y los 70 decibelios, nivel acústico considerado normal. De esta manera, la disminución de la capacidad de memorización aparece como un fenómeno cognitivo, no como una consecuencia del estrés o de un sobresalto.

En un inicio, se dio el nombre de efecto del habla irrelevante o no atendida (*irrelevant speech effect*) al fenómeno descrito. En la actualidad se habla más bien de efecto sonido (*sound effect*), puesto que además del habla, la música también contribuye a ello. Una obra instrumental puede afectar a la memoria a corto plazo, sobre todo si suenan secuencias de notas separadas entre sí a tempo rápido, según la articulación *staccato*, típica de algunos movimientos de conciertos de viento barrocos. Por el contrario, los pasajes con articulación *legato*, los cuales se caracterizan por no articular una separación entre las notas, no poseen un efecto demostrable sobre la memorización a corto plazo.

En 1992, un equipo de psicólogos dirigido por Dylan Jones, de la Universidad de Cardiff, identifi-

DREAMSTIME / MONKEY BUSINESS IMAGES

**ESFUERZO AUDITIVO**
Suenan teléfonos, se oye el repiquetear de los teclados, los compañeros de trabajo conversan entre ellos, etcétera. El ruido de fondo debilita el rendimiento intelectual de los empleados que trabajan en grandes oficinas con un espacio único.

có los *estados cambiantes* de los sonidos de fondo como una característica determinante. En este contexto descubrieron que un sonido repetido (por ejemplo un «ah») con un ritmo o volumen constante no reducía la capacidad de memoria de los probandos. Parecía, pues, que la clave de la cuestión residía en la variación (rápida o ninguna) del murmullo de fondo.

Hoy por hoy, se desconoce por qué nuestra memoria a corto plazo es tan sensible al ruido de fondo. Sin embargo, las consecuencias en el día a día laboral resultan indiscutibles, puesto que en el trabajo usamos la memoria para comprender frases complejas, calcular o retener datos, entre otros menesteres.

Es sobre todo en las grandes oficinas donde se notan los efectos del ruido. Un mismo espacio puede albergar más de 100 mesas de trabajo y, aunque con frecuencia existen muebles separadores que aíslan unas de otras visualmente, no disponen de un aislamiento acústico. El repiqueteo de los teclados, el zumbido de las fotocopiadoras y las conversaciones telefónicas de los compañeros se oyen por doquier. Son estas últimas las que afectan de manera destacada al rendimiento cognitivo, según demostró Baddeley.

Para evitar los efectos nocivos, una solución consiste en reducir la oscilación del ruido de fondo. Mediante absorbentes especiales (techos acústicos, revestimiento de suelos o paredes móviles de material poroso) pueden amortiguarse ciertas frecuencias acústicas. Nuestro grupo de trabajo, junto con un equipo del Instituto de Acústica Técnica de la Universidad Técnica de Aquisgrán, puso a prueba esta opción de forma virtual.

## Malas vibraciones

En un ordenador simulamos dos situaciones similares aunque distintas. Si bien acontecían conversaciones entre dos oficinas en ambos casos, en uno, los despachos se hallaban separados por una pared doble que amortiguaba el volumen acústico y que solo permitía el paso de vibraciones graves (frecuencias de entre 1000 y 4000 hercios). Ello impedía oír, o como mínimo dificultaba su identificación, las consonantes, unidades lingüísticas que ayudan a segmentar el flujo verbal; cuando son imperceptibles, las vocales se funden en una mezcla incomprensible.

En la otra situación, se simuló una pared fina que amortiguaba de manera homogénea el espectro de frecuencia de las voces. De este modo, la comprensión del discurso no se veía muy afectada, solo disminuía el volumen.

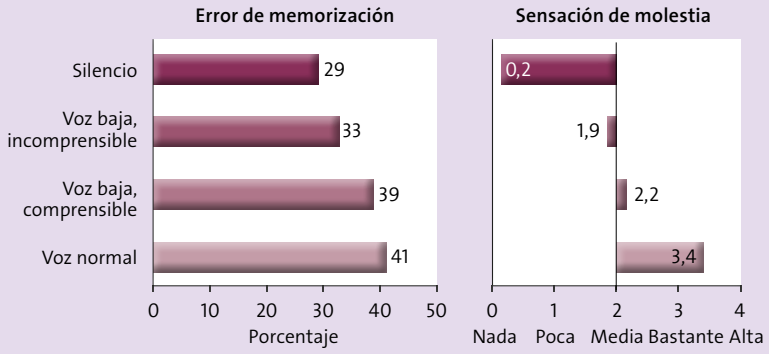
A continuación, expusimos a los probandos a ambas situaciones acústicas (por un lado, voces bajas incomprensibles, por otro, voces bajas todavía inteligibles; en ambos casos con un volumen de unos 35 decibelios). A través de auriculares, los participantes oían frases en su idioma materno. De manera simultánea, debían memorizar números y reproducirlos después en el orden correcto. El experimento se repitió, bien sin que los probandos escucharan nada durante la memorización, bien con el sonido de las frases sin filtrar, es decir, en su volumen original (55 decibelios).

Según los resultados, las voces bajas filtradas influyeron menos en el rendimiento cognitivo de los sujetos que las conversaciones no filtradas pero con el mismo volumen. No obstante, los pro-

## Carga subjetiva y objetiva

**Los murmullos de fondo afectan a la capacidad de memorización y bienestar.** El gráfico de barras izquierdo muestra la tasa de error de probandos que debían reproducir números, los cuales habían memorizado previamente bajo condiciones distintas. En unos casos, la sala estaba en silencio, en otros, los participantes oían voces a diferente volumen y nivel de comprensión. El diagrama de la derecha representa el grado de molestia que expresaron sentir los sujetos. Como era de esperar, la situación que más les incomodó fue el sonido fuerte. También el habla en voz baja les molestó, fuese esta comprensible o no. Sin embargo, dichas percepciones subjetivas no se correspondían con el rendimiento memorístico: si bien cometieron menos errores cuando reinaba el silencio que cuando oían hablar en voz alta, la cantidad de errores no descendía de manera drástica hasta que no disminuía la comprensión de lo que decían las voces.

(«The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance». S. Schlittmeier et al. en *Ergonomics*, vol. 51, págs. 719-736, 2008)




EN BREVE

**Efecto del habla irrelevante** (*irrelevant sound effect*)
Determinados ruidos de fondo irrelevantes disminuyen el rendimiento de la memoria a corto plazo.

**Estado cambiante** (*changing state*)
Los ruidos que varían de un momento a otro resultan en especial molestos para la capacidad cognitiva.

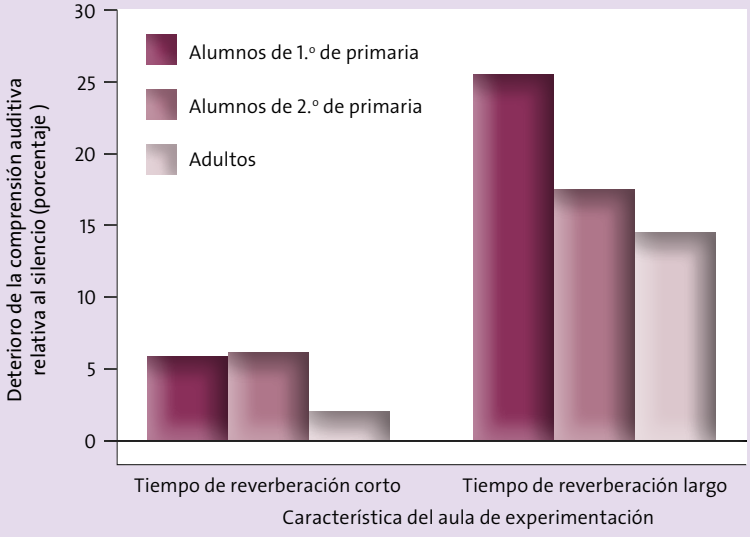
## Eco con efecto

**Las características de construcción de los espacios** contribuyen de manera notable a la aparición o, por el contrario, disminución de ruido. El tiempo de reverberación (la duración del sonido al resonar) constituye el parámetro más importante de la acústica espacial. Veamos dos ejemplos opuestos: por un lado, en las iglesias, el tiempo de reverberación dura varios segundos; por otro, en los estudios de grabación, los sonidos no pueden persistir más de medio segundo. El Instituto Alemán de Normalización (DIN, por sus siglas en alemán) determina que el tiempo de reverberación en los colegios debe ascender a unos 0,6 segundos. Con revestimientos absorbentes del ruido en paredes y techos, casi cualquier aula escolar se ajusta a dicho valor. Aun así, la normativa se incumple en muchos centros, hecho que afecta al aprendizaje en clase.

Cuando el tiempo de reverberación es largo, las sílabas que resuenan cubren el sonido de las siguientes, de manera que la explicación oral del profesor pierde en claridad. Asimismo, los ruidos permanecen más tiempo en el aula y aumenta su volumen. Bajo tales condiciones, el oído de los alumnos debe trabajar más para comprender lo que se dice en clase, esfuerzo que consume recursos cognitivos, es decir, parte de la capacidad para retener y procesar el discurso verbal.

El gráfico inferior muestra el grado de afectación de la comprensión auditiva de escolares de primaria mientras desarrollaban una prueba con ruido de fondo. Se les dividió en dos grupos. Los probandos que ocupaban la sala con condiciones acústicas favorables (tiempo de reverberación corto) obtuvieron mejores resultados que los que se encontraban en una clase con un tiempo de reverberación largo. Por otra parte, los niños mostraban más dificultades de comprensión si se hallaban en un lugar con ruido de fondo y resonancia que los adultos.

(«Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting». M. Klatte et al. en *Noise and Health*, vol. 12, págs. 270-282, 2010)




pios participantes opinaban que habían percibido ambas variantes igual de molestas.

Por otra parte, el deterioro en el rendimiento cognitivo no dependía de si el volumen de las voces de fondo era normal (55 decibelios) o más bien una especie de susurro (unos 35 decibelios), puesto que incluso con un nivel de volumen bajo resultaba perceptible el estado cambiante del sonido. Sin embargo, los probandos señalaron que las frases dichas con un volumen bajo les habían distraído menos.

Además de en el trabajo, las condiciones acústicas desempeñan una importante función en parvularios y escuelas. Los entornos de enseñanza y aprendizaje suelen suscitar entornos ruidosos. El nivel de ruido de una clase o un aula constituye uno de los factores de sobrecarga mental fundamentales en la profesión de educador o docente.

El efecto de sonido irrelevante ya se detecta en las clases de primero de primaria. En los escolares de segundo de primaria, el rendimiento de memorización a corto plazo llega a disminuir hasta un 40 por ciento a causa del murmullo de fondo. Un resultado preocupante, pues el sistema cognitivo sensible al ruido resulta de gran relevancia en el aprendizaje de la lectura. Cuando se deletrea, importa distinguir los fonemas con claridad. Al mismo tiempo, la memoria a corto plazo debe poseer suficiente capacidad para unir los sonidos distintos. Baddeley y su equipo afirman que el bucle fonológico constituye un sistema evolutivo del aprendizaje de la lengua, el cual se desarrolló por la necesidad de aprender el sonido de las nuevas palabras de forma rápida y duradera.

## Emergencia en clase

En 2010 analizamos en un estudio de campo el modo en el que afectaba el ruido al rendimiento de 400 alumnos de segundo de primaria. Dividimos a los niños en tres grupos, según la calidad acústica de sus respectivas clases. Con el fin de comprobar cómo procesaban los sonidos, los alumnos debían decidir cuál de tres palabras se distinguía de las demás por su sonido inicial o final. Desde un altavoz colocado en la mesa del profesor surgían términos reales o inventados. El volumen correspondía al del tono de un docente que hablaba en voz alta.

Los jóvenes probandos de las aulas «silenciosas» se mostraron mejores en la capacidad de

diferenciar sonidos que los alumnos de clases ruidosas. Cabe señalar que esta conclusión no se explicaba por las distinciones en cuanto a inteligencia general o por la presencia de más niños con una lengua materna diferente a la de la grabación del altavoz. En pocas palabras, una peor acústica marcaba la diferencia.

Por otro lado, los alumnos que ocupaban las aulas resonantes y desfavorables acústicamente se quejaban más del ruido. Además, según sus propias declaraciones, su relación con los compañeros y los maestros también era peor.

En situaciones acústicas adversas, las personas deben esmerarse en hacer desaparecer los sonidos molestos y completar continuamente los huecos que surgen en las informaciones verbales, de modo que tienen que forzar su atención y las capacidades auditivas y verbales. El desarrollo de las habilidades necesarias para ello se extiende hasta la adolescencia. Por ello, los niños muestran más dificultades que los adultos en entender los contenidos orales cuando existe un ruido de fondo que afecta a la claridad acústica. Numerosos estudios concluyen que cuanto más jóvenes sean los niños, mejores deben ser las condiciones para la comprensión del habla.

Una de las autoras (Klatte) investigó en 2010 los efectos de los entornos ruidosos sobre la comprensión del habla. En el marco de un estudio de simulación, agravó el rendimiento auditivo de probandos en un aula resonante, en la que reprodujo, además, una grabación de ruido de fondo. La capacidad comprensiva de los niños de primaria empeoró de media un 21 %; la de los adultos, un 14 %. En una sala idéntica, pero mejor aislada, la misma grabación deterioró la capacidad de comprensión tan solo en un 6 % y un 2 %, respectivamente.

## Mejor en primera fila

En una clase con una acústica desfavorable, el lugar en el que se sienta cada escolar influye en su comprensión del habla. El volumen de la voz del profesor disminuye a medida que aumenta la distancia de la fuente de señal. Los ruidos de fondo, en cambio, se oyen con casi la misma intensidad en toda el aula. Por tanto, la relación entre el volumen del estímulo acústico y el del ruido resulta más desfavorable en la zona trasera del aula que delante. En el estudio de Klatte, los alumnos que se sentaban en las últimas filas de la clase con resonancia entendieron mal, de promedio, una de cada tres palabras de la prueba.

ISTOCKPHOTO / IMAGETWO

**PANDEMÓNIUM**
Durante el recreo aumenta el nivel de ruido. También en clase, sobre todo en aulas que resuenan. Ello obstaculiza el proceso de aprendizaje de los alumnos.

Bajo tales condiciones, la concentración resulta casi imposible. Sin embargo, los niños no manifestaron sentirse molestos por el ruido durante los ejercicios, valoración subjetiva que se midió a través de un baremo elaborado con caras sonrientes o tristes según el grado de molestia percibido (de menos a más, respectivamente).

A los adolescentes con dificultades de aprendizaje o problemas de desarrollo les resulta en especial difícil comprender los estímulos verbales si reina un ruido de fondo. También el entendimiento de un idioma extranjero se complica de forma notable si los murmullos interfieren en el ambiente. Ello ocurre incluso cuando los alumnos dominan la segunda lengua a la perfección.

¿Puede un entorno ruidoso influir en el aprendizaje del habla y la lectura? La respuesta es un sí rotundo. Los niños que crecen cerca de grandes aeropuertos manifiestan deficiencias en ambos casos. Con todo, hoy en día contamos con pocos estudios sobre las consecuencias a largo plazo de la contaminación acústica en escuelas y parvularios. Los escasos datos sugieren que una mejora de las condiciones acústicas puede favorecer el desarrollo de las habilidades verbales.

***Jürgen Hellbrück*** *es doctor en psicología laboral, ambiental y de la salud en la Universidad Católica de Eichstätt-Ingolstadt. Su compañera de equipo* ***Sabine Schlittmeier*** *es psicóloga.* ***Maria Klatte*** *es profesora de psicología en la Universidad de Kaiserslautern.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 59

### Para saber más

**Disruption of short-term memory by unattended speech: implications for the structure of working memory.** P. Salamé, A. D. Baddeley en *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, vol. 21, págs. 150-164, 1982.

**Privileged access by irrelevant speech to short-term memory: the role of changing state.** D. M. Jones et al. en *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 44A, págs. 645-669, 1992.

**Schall und Lärm.** J. Hellbrück et al. en *Spezifische Umwelten und Umweltprobleme*, por E.-D. Lantermann et al., págs. 3-44. Hogrefe, Göttingen, 2010.

**Effects of classroom acoustics on performance and well-being in elementary school children: A field study.** M. Klatte et al. en *Environment and Behavior*, vol. 43, págs. 659-692, 2010.

**Nurim Weltall ist es wirklich still. Vom Lärm und der Sehnsucht nach Stille.** S. Geisel. Galiani, Berlín, 2010.

# Recuperar el silencio

Millones de personas oyen sonidos inexistentes para el resto de los mortales. Los acúfenos que les acompañan se originan en su propio cerebro. Aunque no se conoce por ahora una cura definitiva, la estimulación cerebral y la terapia sonora parecen mejorar los síntomas

TOBIAS KLEINJUNG Y BERTHOLD LANGGUTH

«Lo que más me tortura es el estruendo interior, prácticamente ininterrumpido, que retumba en mi cabeza y que, en ocasiones, aumenta hasta convertirse en un estrépito semejante al de una tormenta furiosa. Este rugido penetra como un murmullo de voces, que empieza a modo de falsos cuchicheos y va en aumento hasta convertirse en un terrible griterío, como si se hubiesen desencadenado en mí las furias y todos los espíritus malignos». De esta forma describía el compositor bohemio Bedřich Smetana (1824-1884) su dolencia: los acúfenos o *tinnitus*. En el cuarteto para cuerda *Escenas de mi vida* consiguió traducir el sufrimiento en música: en el movimiento final, el primer violín interpreta durante varios compases un chirriante Mi agudo por encima de un siniestro trémolo en las cuerdas.

Lo mismo que Smetana antaño, en la actualidad unos tres millones personas en Alemania perciben estos ruidos inexplicables. Una cifra similar se registra en otros países de la Europa occidental y en Estados Unidos. Oyen silbidos, zumbidos, cuchicheos, pitidos, tintineos, rugidos, estrépitos o golpes que no se originan en el exterior. Tanto es así que algunos pacientes han llamado al técnico de la calefacción o de la televisión con la esperanza de que arreglara la supuesta fuente del inaguantable ruido.

EN SÍNTESIS

### Ruido sin origen

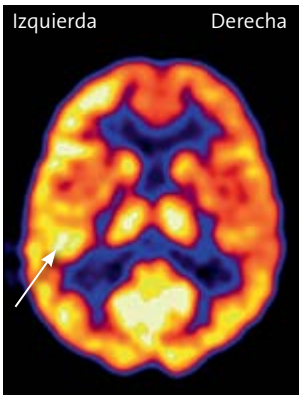
1 Los ruidos que producen los acúfenos se deben a conexiones erróneas en el cerebro que pueden originarse por lesiones en el oído.

2 Con potentes campos magnéticos pueden mejorar los síntomas.

3 También reducen la molestia un sonido con una frecuencia parecida a la de los acúfenos o la neuromodulación a través de una música modificada para tal fin.

**¿ALIVIO PARA EL RUIDO INTERIOR?** En ocasiones, el zumbido de oídos puede tratarse de forma agradable: con música.

DREAMSTIME / ANDRÉS RODRÍGUEZ




CORTESÍA DE TOBIAS KLEINJUNG Y BERTHOLD LANGGUTH

**LA CABEZA TAMBIÉN OYE**
Esta imagen por tomografía de emisión de positrones corresponde a un paciente de 61 años con acúfenos en el lado derecho. Muestra un aumento de la actividad neuronal en el centro auditivo del lóbulo temporal izquierdo (*flecha*) incluso cuando el ambiente está en completo silencio.

No todos los casos son iguales. En algunos sujetos, los acúfenos desaparecen de forma espontánea; otros se acostumbran al constante zumbido. De todos modos, la calidad de vida disminuye en una de cada cuatro personas. Con frecuencia se suman al problema trastornos del sueño, estados de angustia o depresión. Asimismo, los ruidos internos pueden repercutir en la vida profesional, hasta incluso provocar una incapacidad laboral. No pocas veces, los pacientes muy aquejados se sienten incomprendidos por la familia y los amigos, por lo que se retraen cada vez más. Aunque por ahora se desconoce un método definitivo para combatir los acúfenos, los avances neurocientíficos en torno a las causas del fenómeno aportan nuevos conocimientos para posibles tratamientos.

Durante largo tiempo se partió de la idea de que los zumbidos se originaban en el oído interno. Según la opinión predominante, un aumento de la actividad de las células ciliadas allí alojadas se transmitía a través del nervio auditivo hasta el cerebro, dando lugar a la molesta sensación acústica. En los casos graves, los cirujanos llegaban incluso a seccionar el nervio auditivo, con nefastas consecuencias: los pacientes quedaban sordos del lado operado y los acúfenos persistían.

Si el problema no depende del oído interno, ¿dónde se aloja entonces? Gracias a la experimentación con animales y las técnicas de neuroimagen se sabe en la actualidad que la causa reside en otro lugar: en el cerebro [*véase* «Zumbido de oídos», por Gerald Langner y E. Wallhäusser; Mente y cerebro n.º 5, 2003]. Sin embargo, no debe prescindirse por completo del oído: en la mayoría de los casos existe una alteración auditiva. Las frecuencias que peor percibe el afectado se corresponden, por regla general, con las de los acúfenos. Del mismo modo que ocurre con el dolor fantasma, propio de las personas que han sufrido una amputación [*véase* «Miembros fantasma», por R. Melzack; Investigación y Ciencia, junio de 1992], los acúfenos aparecen cuando el cerebro del paciente intenta compensar la disminución en la entrada de información (en este caso, sonora).

## Conexión errónea

Tal fenómeno cerebral se ha constatado en animales. Tras una pérdida de la audición, los individuos presentan un aumento de la actividad nerviosa en la vía auditiva central. Al parecer, ello compensa la escasa oferta de estímulos al oído. Tanto los animales como las personas perciben ese incremento de la actividad como un ruido, a pesar de que no exista una señal acústica que lo provoque. La base de esta conexión errónea radica en la plasticidad del sistema nervioso central, capaz de adecuarse de modo flexible a la variedad de exigencias o lesiones. Pese a que esta flexibilidad facilita los procesos de aprendizaje, también puede acarrear consecuencias negativas, tales como el dolor fantasma.

Los médicos investigan las diferencias neuronales entre los pacientes con acúfenos y las personas sanas (de control) a través de la tomografía por resonancia magnética funcional (TRMf) o por emisión de positrones (TEP). Dichas técnicas de neuroimagen miden, respectivamente, la vascularización y los cambios metabólicos en el cerebro. Según revelan las imágenes, no solo se encuentra más activa la corteza auditiva en el lóbulo temporal de los afectados, incluso la vía auditiva central acusa una actividad alterada. Esta vía incluye importantes puntos de conexión sensorial: los centros auditivos del tronco encefálico, la placa cuadrigémina en el mesencéfalo y el tálamo en el diencéfalo.

Métodos electrofisiológicos, entre ellos, la electroencefalografía (EEG) o la magnetoencefalografía (MEG), permiten obtener información más refinada a partir de un perfil exacto en tiempo real de la actividad neuronal en la corteza auditiva. De este modo se demuestra que las fibras neuronales se activan de forma sincrónica, igual que sucede en la audición de una fuente sonora real. No obstante, ello no se limita a la corteza auditiva, según averiguaron en 2009 Winfried Schlee y sus colaboradores de la Universidad de Constanza. Mediante MEG hallaron que el aumento de la actividad neuronal sincrónica se asociaba a una activación de amplias áreas cerebrales importantes en la regulación de la atención, las emociones y el estrés. A estas se sumaban diversas regiones clave del sistema límbico; en especial la amígdala, centro de control de las emociones.

## Estimulación del cerebro

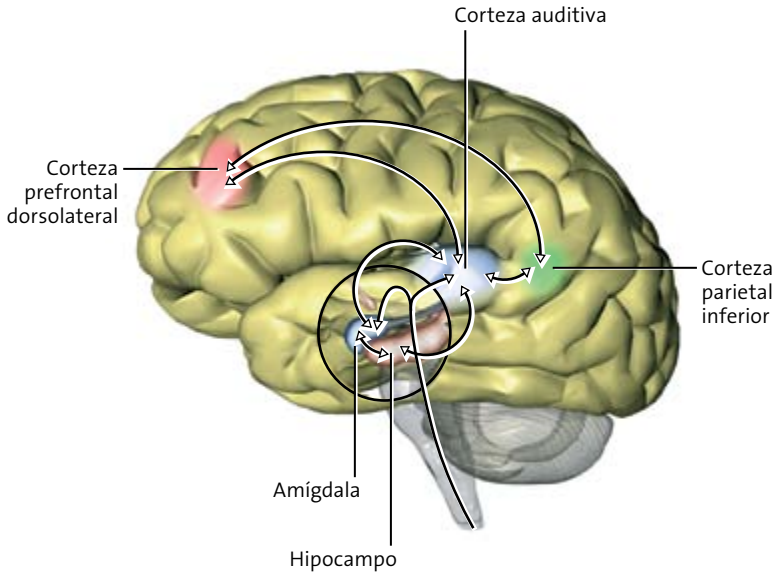
Así pues, los acúfenos descansan sobre las alteraciones de actividad en una compleja red, la cual no solo incluye el sistema auditivo central y periférico, sino también ciertas áreas del encéfalo que no se encuentran directamente relacionadas con la percepción de los sonidos.

### Webs

**www.tinnituszentrum-regensburg.de/**
*Centro para el tinnitus de la Universidad de Ratisbona*

**www.tinnitus-liga.de/index.php**
*Liga alemana contra el tinnitus*

**acufenos.org**
*Asociación de personas afectadas por tinnitus*




**ÁREAS NEURONALES DE CONEXIÓN**
Diversas regiones cerebrales participan en la percepción de sonidos tanto reales como supuestos. La corteza auditiva en el lóbulo temporal procesa las señales que le llegan del oído. Sin embargo, solo cuando se activa de forma simultánea la red neuronal responsable de la atención, formada por la corteza prefrontal dorsolateral y una parte de la corteza parietal, las señales acústicas se hacen conscientes. Áreas profundas del cerebro, como la amígdala y el hipocampo, asocian los sonidos a emociones y los almacenan en la memoria.

GEHRN UND GEIST / MEGANIM

De esa manera, las señales acústicas se hacen conscientes cuando las procesan áreas cerebrales superiores, tales como la corteza dorsolateral prefrontal del lóbulo frontal y el lóbulo temporal. La participación de estas áreas no auditivas se asemeja al patrón de actividad cerebral en el caso de dolores crónicos. No es casual que muchos pacientes experimenten el zumbido de oídos como una sensación muy desagradable.

La complejidad de los procesos que provocan la instauración de los acúfenos dificulta su tratamiento. Hasta hace pocos años se carecía de medios para combatir la raíz de la dolencia. Por ello, la mayoría de los tratamientos médicos se han centrado en ayudar a los pacientes a habituarse al ruido. A través de la terapia conductista se les enseña a distraer su atención de forma que acepten con mayor facilidad el ruido fantasma y no lo sientan como una carga pesada. Asimismo, el uso selectivo de otros ruidos para la supresión parcial de los acúfenos puede contribuir al alivio del problema.

Aunque hasta el momento no se dispone de medicamentos eficaces contra los acúfenos, existen fármacos para tratar los síntomas acompañantes, tales como los trastornos del sueño o la depresión.

Con todo, mediante la estimulación magnética transcraneal (EMT) puede influenciarse de forma directa sobre el zumbido de oídos. A través de la calota craneal se aplica un campo magnético de 1,5 a 2 teslas (unas 40.000 veces más potente que el campo magnético de la Tierra), lo que desencadena un potencial de acción en las neuronas superficiales de la corteza cerebral próximas. A partir de esta técnica, Anthony Barker, de la Universidad de Sheffield, consiguió por primera vez en 1985 provocar el movimiento de un brazo al estimular áreas cerebrales motoras. Hoy la EMT se ha convertido en un destacado instrumento dentro de la investigación neurológica. Si se aplica durante unos días de manera regular de 20 a 40 minutos, puede producir una alteración de la actividad neuronal a largo plazo, lo cual posibilita su aplicación terapéutica.

La corteza cerebral auditiva de los afectados de acúfenos muestra una actividad patológicamente aumentada. Esto nos llevó a aplicar la EMT de forma específica en esta zona con la intención de paliar las molestias de nuestros pacientes en el Centro de Tinnitus de la Universidad de Ratisbona. En varios estudios demostramos que en casi la mitad de estas personas disminuían las molestias, al menos de forma temporal.

El resultado depende, en este caso, de diversos parámetros de la EMT: frecuencia e intensidad utilizadas, forma y orientación de la bobina magnética y número de sesiones practicadas, entre otros. Un tratamiento combinado de la estimulación magnética transcraneal de la corteza auditiva y de áreas cerebrales frontales, responsables de la cognición y de las emociones, mejoró la situación de algunos pacientes.

EN BREVE

**Los acúfenos** o *tinnitus* refieren un trastorno en el que los pacientes oyen ruidos sin que exista una fuente externa que los produzca. Los médicos distinguen entre acúfenos objetivos y subjetivos. En el primer caso, la raíz del problema se encuentra en el organismo del paciente (ruido producido por la corriente sanguínea, entre otras causas). Más frecuentes son los acúfenos subjetivos: no existe ninguna fuente sonora ni externa ni interna. Se trata de una «percepción fantasma». Los acúfenos comprenden sonidos muy diversos, pueden presentarse de forma recurrente o permanente así como unilateral o bilateral, o bien percibirse en el centro de la cabeza.

A pesar de los resultados terapéuticos prometedores, el desarrollo de estos métodos se encuentra todavía en pañales. Necesitamos más estudios para seguir optimizando los parámetros de la EMT y mejorar así el efecto clínico.

La actividad neuronal alterada que causa los acúfenos puede influenciarse también mediante neurorretroalimentación (*neurofeedback*). A través de EEG se mide la actividad cerebral; las alteraciones patológicas se reproducen en una pantalla mediante formas gráficas fáciles de reconocer. El paciente recibe de esta manera una retroalimentación directa sobre su actividad cerebral, con lo que puede aprender a normalizar la actividad neuronal que subyace a los acúfenos.

Con frecuencia, los acúfenos aparecen en el curso de una pérdida en la capacidad auditiva (hipoacusia), por lo que no sorprende que los pacientes puedan mejorar con el uso de audífonos. Según informaba en 2008 un equipo liderado por Paul Van de Heyning, de la Clínica Universitaria de Amberes, pacientes con acúfenos e hipoacusia unilateral se beneficiaron de un implante coclear a modo de prótesis auditiva.

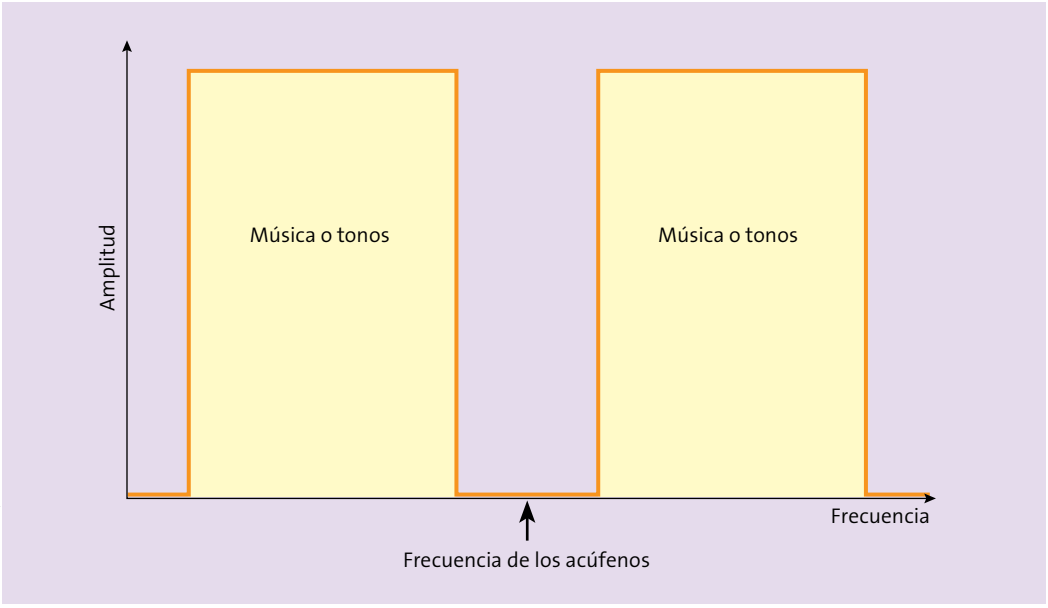
El grupo en torno a Christo Pantev, de la Universidad de Münster, desarrolló en fecha reciente otro método de estimulación acústica: la estimulación acústica de frecuencias vecinas a las de los acúfenos. Sus pacientes no padecían una importante pérdida de la capacidad auditiva, no obstante, percibían en uno de los oídos un desagradable silbido constante de una frecuencia inferior a los ocho kilohercios.

A lo largo de un año, los investigadores invitaron a ocho de los pacientes a oír durante una o dos horas diarias su música preferida. Previamente filtraron las franjas de frecuencia de las canciones en torno a una octava del tono de los acúfenos. Se pensaba que la presentación de tonos próximos a los acúfenos tendría un efecto inhibitorio en la actividad de las neuronas que subyace a estos zumbidos molestos. Una música adecuada contribuiría a tornar reversible esta reorganización neuroplástica de la corteza cerebral auditiva.

En efecto, en 2010, los investigadores informaron de que, tras la musicoterapia, la intensidad de los acúfenos había disminuido en los ocho pro-

**MAGNETISMO SANADOR**
Una bobina metálica en el lóbulo temporal izquierdo de la paciente origina un potente campo magnético que actúa sobre la actividad neuronal de la corteza auditiva. De esta forma, los médicos reducen las molestias de los acúfenos.

CORTESÍA DE TOBIAS KLEINJUNG Y BERTHOLD LANGGUTH




GEHIRN UND GEIST, SEGÚN TOBIAS KLEINJUNG Y BERTHOLD LANGGUTH

**HUECO DECISIVO**
En el curso del tratamiento con terapia sonora, los pacientes oyen música o tonos en los que se han filtrado determinadas frecuencias por encima y por debajo de la auténtica tonalidad del acúfeno. Ello reduce la actividad espontánea de la corteza auditiva para las mismas frecuencias.

bandos. Por el contrario, los otros tantos sujetos de control, que habían escuchado durante el mismo período de tiempo canciones sin una banda de frecuencias alejada del tono de los acúfenos que padecían, no mostraron ninguna mejoría.

## Música terapéutica

Exploraciones llevadas a cabo con MEG confirman la eficacia de la terapia musical personalizada: en los pacientes tratados, la corteza cerebral auditiva reacciona a las frecuencias de los acúfenos de forma más débil que antes del tratamiento. Ello parece demostrar que las piezas musicales modificadas según las necesidades de cada individuo reducen al menos las conexiones cerebrales patológicas. Pantev y sus colaboradores esperan que su musicoterapia suponga una alternativa eficaz y, al mismo tiempo, agradable para los procedimientos terapéuticos habituales del *tinnitus* crónico.

El equipo de Peter Tass, del Centro de Investigación Jülich, experimenta otra variedad de estímulo acústico personalizado. Estos investigadores han desarrollado un algoritmo de estimulación siguiendo el principio del reinicio coordinado (*coordinated reset*): las vías nerviosas hipersincrónicas y sobreactivadas se modifican mediante estímulos irregulares y ajustados individualmente, de manera que provocan un «caos sano». De esta forma se pretende llevarlas, específicamente y de manera consecutiva, a su condición ordinaria para que transmitan sus señales.

Como en el caso de la musicoterapia de Münster, una premisa para ese tratamiento es que el zumbido de oídos presente una frecuencia comprendida entre los 200 y los 10.000 hertzios. El neuroestimulador para los acúfenos de Jülich emite, a través de auriculares provistos de unos altavoces con una potencia en los límites de la audición, unas frecuencias por encima y por debajo del tono de los acúfenos perfectamente calculadas.

Los primeros resultados de esas pruebas, realizadas en 2010 en 63 pacientes, hablaban a favor de la eficacia del método. Al final del tratamiento, los pacientes afirmaron que el molesto ruido no solo les resultaba más débil, sino que también sonaba más grave, lo que aliviaba la desagradable sensación. En un futuro se verá si este estimulador se impone en la práctica clínica.

De momento conocemos bastante bien el mecanismo de producción de los acúfenos. Además, la colaboración de científicos de diversas disciplinas ha llevado a unos planteamientos terapéuticos novedosos que, al menos, reducen las molestias del paciente. Sin embargo, la desaparición total de los molestos zumbidos, chirridos o rugidos de oídos sigue siendo el objetivo principal de los investigadores.

***Tobias Kleinjung*** *es otorrinolaringólogo en el Hospital Universitario de Zúrich. Junto con el neurólogo y psiquiatra* ***Berthold Langguth*** *dirige el Centro Interdisciplinar para el Tinnitus de la Universidad de Ratisbona.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 61

### Para saber más

**Transcranial magnetic stimulation (TMS) for treatment of chronic tinnitus: Clinical effects.** T. Kleinjung et al. en *Progress in Brain Research*, vol. 166, págs. 359-367, 2007.

**Neural activity underlying tinnitus generation: Results from PET and FMRI.** C. P. Lanting et al. en *Hearing Research*, vol. 255, págs. 1-13, 2009.

**Listening to tailor-made notched music reduces tinnitus loudness and tinnitus-related auditory cortex activity.** H. Okamoto et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, págs. 1207-1210, 2010.

# ¿Quién llama?

Hasta ahora, los médicos atribuían la incapacidad de reconocer la voz del interlocutor a una lesión cerebral. Sin embargo, parece que el trastorno también puede tener un origen congénito

ANNEGRET FABER

FOTOLIA / PICTURE-FACTORY / MICHAELA ROFELD

**¿ERES TÚ, MAMÁ?**
Una persona incapaz de reconocer la voz de los demás experimenta problemas en especial al teléfono. Le resulta frustrante que los propios familiares deban presentarse cada vez que se acerca el auricular a la oreja.

Hace algo más de tres años recaló una reveladora llamada telefónica en el Colegio Universitario de Londres. Al otro lado del auricular hablaba una mujer. «Por favor, examinen de una vez mi capacidad para reconocer las voces», solicitó. Según explicó a la persona que atendía su ruego, desde siempre le costaba identificar la voz de los demás, fenómeno al que no daba más importancia, pero acababa de leer en Internet una información sobre la incapacidad de ciertos individuos para reconocer las caras; es posible que ella, de 60 años, sufriera un trastorno parecido, aunque de naturaleza auditiva.

«Seguramente esta llamada causó por entonces un gran revuelo», señala Katharina von Kriegstein, hoy en el Instituto Max Planck de Cognición y Neurociencias en Leipzig. «Jamás se había oído el caso de una persona que, sin padecer una lesión cerebral, pudiera presentar este trastorno; tampoco existían pruebas firmes para aclarar el cuadro clínico». En aquel momento, Von Kriegstein colaboraba en la Universidad de Newcastle y en el Centro Wellcome Trust de Neuroimagen. «Para explorar a fondo el asunto, los colegas debían idear primero métodos de evaluación adecuados», recuerda. Al poco tiempo de la llamada, confirmaron que la mujer tenía razón.

El sentido auditivo de KH, iniciales con las que esta paciente aparece en la bibliografía especializada, era normal. Reconocía las piezas musicales y los ruidos tan bien como una persona sin problemas de audición. Tampoco presentaba dificultades para diferenciar las voces masculinas de las femeninas o las alegres de las tristes. Además, reconocía las caras de las personas. Sin embargo, cuando trataba de identificar una voz concreta, ya fuera una locución grabada de actores, ya de políticos o presentadores populares, erraba en el intento. Todo apuntaba a que la deficiencia se debía a un trastorno del desarrollo, puesto que esta mujer no había sufrido ninguna lesión cerebral. «El trastorno de KH parece ser sumamente específico y afectar un único dominio cognitivo», resumían los investigadores del grupo de Lucía Garrido, del Colegio Universitario de Londres, que llevaron a cabo las pruebas.

Por teléfono, KH no reconoce ni siquiera a su hija. «Hola, soy yo, tu hija», debe saludarla cada vez esta última para que sepa que es ella la que se encuentra al otro lado del auricular. Las estrategias para superar la singular deficiencia sensorial han formado parte de la vida personal, social y laboral de KH. En su empleo anterior se cambió el nombre de pila con el objetivo de poder diferenciar si quien la llamaba por teléfono era alguien del trabajo, pues en ese caso utilizaba el «sobrenombre» para preguntar por ella. Otra estratagema que usa en su día a día consiste en telefonear solo si ha acordado antes la llamada.

KH no sufre ninguna patología, apunta Von Kriegstein: «Su problema puede describirse como déficit selectivo. Se trata de la carencia de un talento determinado, como les ocurre a las personas que les cuesta orientarse». Solo podría hablarse de un trastorno si esa característica provocase dificultades en las relaciones sociales de la paciente, de manera que le impidiese establecer un círculo de amistades.

## Fenómeno misterioso

En 1982, Diana Roupas Van Lancker y Gerald Canter, por entonces en la Universidad Nororiental de EE.UU., propusieron por primera vez el concepto *fonagnosia*. Van Lancker y Canter consideraban este déficit como consecuencia de un accidente cerebrovascular o de otras lesiones cerebrales. Constataron que los pacientes con lesiones en el hemisferio derecho, en especial en el lóbulo parietal de dicho lado del cerebro, no reconocían con frecuencia las voces de personajes famosos. En cambio, cuando se afectaba el lóbulo temporal (con independencia del hemisferio al que pertenecía), los sujetos presentaban mayor dificultad para diferenciar las voces. La suposición de que la fonagnosia obedecía solo a lesiones cerebrales prevaleció casi durante treinta años, hasta que se publicó el caso de KH.

Continúa siendo un misterio por qué estas personas no logran identificar a sus semejantes por la voz. ¿Les suenan todas las voces iguales, como si cada individuo hablara a través de un mismo distorsionador que las unificara? «Es harto probable que esta suposición no se aleje tanto de la realidad», afirma Von Kriegstein. Desde hace años, esta científica investiga los mecanismos neurobiológicos de la fonagnosia. Sin embargo, los probandos escasean. Hasta hace poco, KH era la única persona que había nacido con esta carencia tan específica y, al parecer, congénita.

Tal escasez no conlleva necesariamente que la fonagnosia sea una alteración extraña. Un dos

EN SÍNTESIS

### Alteración sensorial

1 A pesar de tener un sentido auditivo normal, algunos sujetos son incapaces de reconocer la voz de otras personas. Ello ocasiona enormes dificultades en su vida cotidiana.

2 Desde hace tiempo se sabe que este déficit sucede después de ciertas lesiones cerebrales. Pero, al parecer, también puede ser congénito.

3 Se desconocen las funciones cerebrales que se alteran. Faltan estudios concluyentes.

por ciento de la población de Alemania, es decir, alrededor de medio millón de personas, podrían sufrirla, sospecha Von Kriegstein. La investigadora apoya su conclusión en los datos referentes a otro problema parecido, la prosopagnosia o incapacidad para reconocer caras [*véase* «Prosopagnosia infantil», por Thomas Grüter; MENTE Y CEREBRO n.º 30, 2008]. «Durante mucho tiempo se ha pensado que no valía la pena investigar la prosopagnosia debido a su rareza», señala Von Kriegstein. «Solo en el último decenio se ha comprobado el error. Es posible que este trastorno afecte hasta a un dos por ciento de la población», aclara. En su opinión, existe una similitud entre ambas alteraciones sensoriales.

Con el objetivo de ahondar en el tema, Von Kriegstein creó hace unos dos años un grupo de investigación en el Instituto Max Planck de Cognición y Neurociencias, en Leipzig. La primera tarea del equipo consistió en establecer una prueba auditiva en Internet con el fin de reclutar a sujetos con fonagnosia para sus exploraciones. Dicho examen se basa en los datos obtenidos por los investigadores a partir del caso de KH (puede llevarse a cabo en línea y en alemán en www.cbs.mpg.de/groups/misc/humcomm/phonagnosia). La prueba resulta difícil incluso para personas con una audición «normal». Su responsable explica el motivo: «Debíamos poner un dintel alto, pues no sabemos cuáles son las estrategias que elaboran los individuos con fonagnosia a lo largo de su vida para diferenciar las voces».

El psicolingüista Florian Hintz, también del Instituto Max Planck, sirve de probando para este artículo. Sentado frente al ordenador, sigue las instrucciones que le indica la pantalla. En un inicio, escucha varias voces; debe aprenderse los nombres de las personas a las que pertenece cada una de ellas. A continuación vuelve a escuchar las mismas voces, a las que ahora debe asignarles un dueño. La evaluación termina a los 20 minutos. Resultado: Hintz reconoce de forma correcta el 70 por ciento de las voces propuestas. Se encuentra en la media.

## Gran pesquisa en el laboratorio

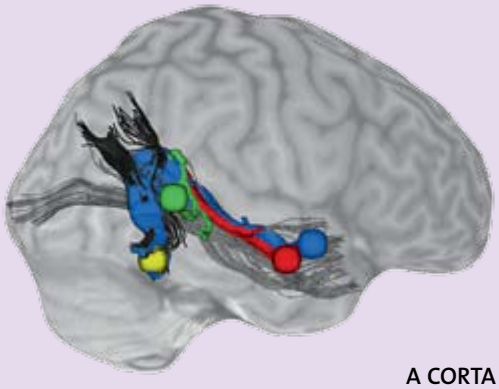
Los participantes que alcanzan una puntuación más baja del 50 por ciento despiertan el interés de los investigadores, por lo que quedan inscritos. Ahora bien, recibir un correo electrónico del Instituto Max Planck no equivale en absoluto a

## Donde audición y visión coinciden

**Katharina von Kriegstein, del Instituto Max Planck de Cognición y Neurociencias,** centra sus investigaciones en los mecanismos para el reconocimiento de la voz y del habla. Entre otros fenómenos, ha constatado que los humanos reconocemos mejor la voz de una persona si antes la hemos relacionado con la cara de su propietario. La concurrencia de voz y rostro permite que las áreas cerebrales respectivas colaboren más intensamente.

Los individuos con prosopagnosia (incapacidad de reconocer caras) también aprovechan dicho efecto, aunque de manera limitada. Cuando miran a la cara a su interlocutor, entienden mejor su discurso, según comprobaron Von Kriegstein y sus colaboradores. A pesar de que los prosopagnósticos no reconozcan el rostro de la otra persona, son capaces de analizar su mímica. Cuando escuchamos la voz de un individuo que conocemos, nuestro cerebro simula la cara correspondiente y sus gestos, lo cual ayuda a reconocer al interlocutor y a entender su habla.

En 2011, Von Kriegstein y su grupo descubrieron la existencia de comunicaciones neuronales directas entre áreas cerebrales sensibles a los estímulos faciales y vocales. Las mediciones a partir de la técnica de difusión por resonancia magnética confirmaron este hallazgo. Las áreas cerebrales encargadas de reconocer las caras y las voces colaboran de forma directa, hecho que, posiblemente, beneficia la capacidad de reconocimiento de las personas. Este dato contradice la extendida suposición de que dichas regiones se encuentran asociadas solo de manera indirecta a través de las áreas superiores del cerebro.



**A CORTA DISTANCIA**

Las áreas cerebrales responsables de la identificación de voces y caras se hallan unidas directamente. Desde el área fusiforme de reconocimiento facial (*amarillo*) emergen fibras nerviosas hacia regiones situadas en el surco más alto del lóbulo temporal (*verde, rojo y azul*), las cuales intervienen en el reconocimiento de la voz.

DE: DIRECT STRUCTURAL CONNECTIONS BETWEEN VOICE- AND FACE-RECOGNITION AREAS H. BLANK ET AL. EN *JOURNAL OF NEUROSCIENCE*, VOL. 31, PÁGS. 12.906-12.915, 2011

sufrir fonagnosia. Von Kriegstein tranquiliza: «Si se desarrolla la prueba sin estar concentrado o con unos auriculares defectuosos, el rendimiento desciende enseguida. Por ello, cuando observamos resultados muy pobres, primero enviamos un cuestionario al participante. En función de sus respuestas, le invitamos a desarrollar nuevas pruebas». Solo se explora a los sujetos que presentan el susodicho defecto desde siempre, es decir, prácticamente desde el nacimiento.

Entre 2011 y mediados de 2012, cerca de 600 individuos complementaron la prueba auditiva a través de Internet. Los investigadores escribieron a uno de cada seis probandos; de los 35 que respondieron, solo uno resultó un buen candidato: Elisa S. (nombre ficticio), estudiante en Colonia. Unos meses después del primer contacto, la joven acudió al Instituto. A pesar de que presentaba graves problemas para identificar las voces, todavía se desconoce a ciencia cierta si presenta una fonagnosia. La certeza solo se obtendrá con nuevas pruebas.

La propia Elisa S. ha mostrado interés por el asunto. Con humor aborda su vida cotidiana: «A veces resulta desagradable que llame alguien y no diga su nombre. Eso me puede irritar un poco. Por suerte, hoy por hoy, en la mayoría de las llamadas aparece el número del interlocutor en la pantalla». Con frecuencia, el acento o dialecto de la persona que telefonea la ayuda en su pesquisa. Como le sucede con su padre, natural de Italia. No obstante, si otro hombre también con acento italiano la llama, se confunde con frecuencia.

Esta estudiante se percató de su deficiencia a los veinte años. Antes de ello creía que todas las personas oían igual que ella; que nadie reconocía la voz de quien se encontraba al otro extremo del auricular. «Un día, mi marido me hizo una observación mientras estábamos viendo la televisión. Se refería a la peculiar voz sincrónica de Alf. Pensé, pero ¿qué está diciendo? No entendía por qué las voces de los demás debían sonar diferentes». Cuando Elisa S. es incapaz de identificar la voz de un buen amigo al teléfono, debe soportar con frecuencia ciertos comentarios: «Nos conocemos desde hace cinco años, ¿y todavía no sabes quién te llama por teléfono?». Por ese motivo valora el hecho de saber que existen otras personas a las que les sucede algo similar.

Con todo, los individuos con fonagnosia disponen de múltiples posibilidades para compensar su limitación perceptiva en su día a día. El sufrimiento que experimentan no alcanza el de los prosopagnósticos, comenta Von Kriegstein. Ello podría dificultar la búsqueda de personas afectadas dispuestas a someterse a pruebas extensas. «Es probable que muchos sujetos ni siquiera sean conscientes de su déficit, que piensen que simplemente se despistan.»

Mediante imagen por resonancia magnética funcional (RMf) se compara la actividad cerebral de sujetos con fonagnosia con la de individuos «sanos», de manera que se detectan las funciones alteradas en el cerebro de los primeros. «Existen tres regiones cerebrales con una misión específica para el reconocimiento o procesamiento de las voces. Las tres se localizan en el lóbulo temporal derecho», agrega la investigadora.

Un área del encéfalo que despierta un interés especial a la investigadora es la cara anterior del surco más alto del lóbulo temporal. Según muestran las IRMf, dicha región se activa siempre que los probandos reconocen una voz. Es probable que los sujetos con fonagnesia presenten una carencia en este lugar del cerebro. No obstante, se requiere un número suficiente de participantes para constatar este tipo de hipótesis. «Seguiremos esperando», concluye Von Kriegstein. «Si no aparece nadie más, estudiaremos, para empezar, el caso de Elisa S.»

***Annegret Faber*** *es periodista científica.*

## Reconocimiento de la voz a examen

**Los investigadores del Instituto Max Planck de Cognición y Neurociencias** han colgado una prueba auditiva en Internet. Los interesados pueden comprobar en línea su capacidad para identificar las voces. Los resultados son transmitidos al instituto. La prueba (en alemán) puede descargarse en **www.cbs.mpg.de/groups/misc/humcomm/phonagnosia**.

Para empezar con el test, el usuario debe indicar una dirección de correo electrónico, la edad y el sexo. A continuación se oyen tres voces femeninas que formulan oraciones sencillas («El jefe dirige la empresa» o «El ladrón ha robado el ordenador»). Para cada frase se muestra el nombre de la hablante. Tras esta fase de aprendizaje, empieza la verdadera prueba: se escuchan por separado las voces de las tres mujeres; en cada ocasión el probando debe pulsar el nombre correspondiente. El mismo procedimiento se repite a continuación con tres voces masculinas.

Aunque la prueba puede resultar sencilla al principio, poco a poco se va complicando. El tiempo de escucha se reduce y la secuencia de interlocutores se acelera, hasta provocar la subjetiva impresión de que las voces se parecen. La mayor dificultad reside en recordar el nombre correcto que corresponde a cada voz sin tener delante la cara del hablante. En cualquier caso, la prueba exige concentración y unos buenos altavoces o auriculares.

## Para saber más

**Implicit multisensory associations influence voice recognition.** K. von Kriegstein y A. L. Giraud en *Public Library of Sciences Biology*, vol. 4, págs. 1809-1820, 2006.

**Simulation of talking faces in the human brain improves auditory speech recognition.** K. von Kriegstein et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, págs. 6747-6752, 2008.

**Direct structural connections between voice-and face-recognition areas.** H. Blank et al. en *Journal of Neuroscience*, vol. 31, págs. 12.906-12.915, 2011.

# Aroma a medida

Nuestra nariz es capaz de distinguir entre miles de sustancias olorosas, incluso entre aquellas que apenas se diferencian en su composición química. La corteza olfatoria utiliza para ello una especie de interruptor basculante

JÖRN NIESSING

EN SÍNTESIS

### Percepción compleja

1 En el bulbo olfatorio del cerebro se reflejan los aromas a través de patrones de actividad. Estos se asemejan entre sí en el caso de sustancias químicas emparentadas; aunque solo al inicio.

2 Las diferencias entre los respectivos patrones aumentan conforme se incrementa el tiempo procesado. Los aromas parecidos acaban por resultar distintos.

3 El bulbo olfatorio funciona según el principio del interruptor basculante: cuando se modifica la concentración de dos aromas semejantes en una mezcla cambia de repente el patrón de actividad neuronal.

Un complejo buqué de grosella negra, un aroma que recuerda a las virutas de lápiz y refinado con discretas notas a humo, cuero y chocolate. Los amantes del vino disponen de un vocabulario rebosante de fantasía para describir sus caldos preferidos. Pese a que la percepción de fragancias se antoja seductora, a menudo resulta también desconcertante. La mercaptometilpentanona, sustancia que aporta a un buen vino tinto el aroma de grosella negra, huele en altas concentraciones a orina de gato.

La mezcla de sustancias olorosas complica aún más el asunto. Para descifrar el olor a rosa, nuestra nariz debe enfrentarse a una combinación de más de 500 aromas, aunque uno de estos ingredientes, el geraniol, ya evoca por sí solo a la flor del rosal. Por otro lado, las mixturas aromáticas producen impresiones sensoriales novedosas a nuestro olfato, pues apenas distinguimos cada uno de sus componentes; incluso somos incapaces de diferenciarlos.

Los procesos cerebrales en los que descansan los fenómenos sensoriales descritos constituyen, hoy por hoy, un enigma. Pese a ello, existe una certeza: las células olfatorias de la nariz no son las únicas que registran las sustancias olorosas. Antes bien, la estimulación de dichas células da el pistoletazo de salida a un complejo procesamiento de los estímulos sensoriales en las redes neuronales del sistema olfativo.

En un principio, el cerebro extrae los datos sensoriales principales de un torrente de señales entrantes, los valora y relaciona con experiencias anteriores. A continuación, la corteza olfatoria clasifica las impresiones sensoriales recibidas por categorías, según las respectivas propiedades químicas. En el Instituto Friedrich Miescher de Investigación Biomédica nos hemos propuesto ahondar en los principios de este proceso, objetivo que nos ha llevado a descubrir características sorprendentes del sistema olfativo. Estas podrían explicar algunos de los misteriosos fenómenos en torno al sentido de la olfacción.

Antes de que la red neuronal de la corteza olfatoria procese las señales olorosas, ya han sucedido ciertos acontecimientos. Los humanos disponen de más de 350 tipos de células olfatorias en la nariz, las cuales captan la composición química del olor y traducen las impresiones sensoriales en señales eléctricas, es decir, en el idioma del sistema nervioso [*véase* «El olfato», por Hanns Hatt; MENTE Y CEREBRO n.º 11, 2005]. Esta primera representación del mundo de los aromas se redirige para su análisis posterior en el bulbo olfatorio. Es en esta región donde finalizan las terminaciones nerviosas de las células sensoriales y se conectan a las células mitrales (neuronas que deben su nombre a su aspecto en forma de mitra). Estas zonas de contacto semejan pequeñas estructuras esféricas, los glomérulos, que constituyen la primera estación del procesado de los aromas.

## Olfato en los peces

En 1997, Rainer Friedrich y Sigrun Korsching, ambos del Instituto Max Planck de Biología Evolutiva, en Tubinga, indagaron el modo en que reaccionan los glomérulos ante determinadas sustantias olorosas. Para ello inyectaron pigmentos fluorescentes en las fosas nasales de peces cebra. En cuanto penetraba calcio en las terminaciones de las células nerviosas de los glomérulos, el producto de tinción se iluminaba. Este método permitió a los investigadores crear mapas glomerulares.

La actividad de los glomérulos reflejaba las características químicas de los aromas: cada uno activaba distintas áreas neuronales (caso de los

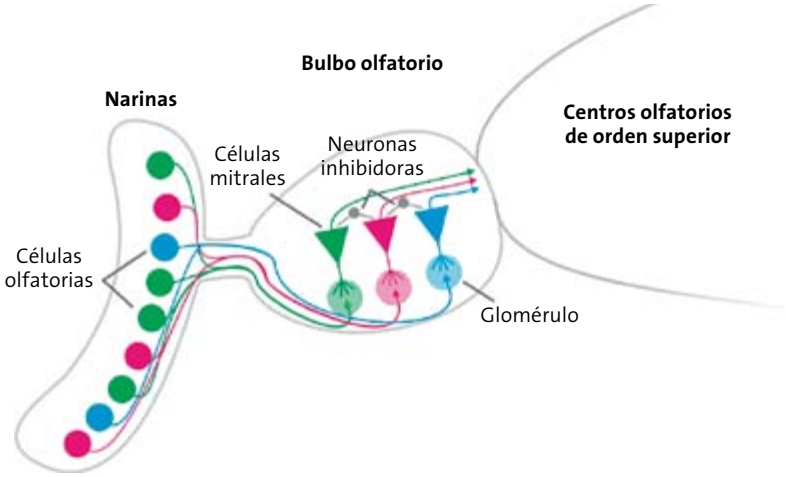
aminoácidos arginina y alanina). Más complicada se antojaba la tarea de distinguir entre sustancias olorosas similares (los aminoácidos alanina y serina, por ejemplo). ¿El motivo? Las sustancias químicamente emparentadas, así como una misma sustancia pero en diferentes concentraciones, pueden originar un mapa de actividad parecido. En el caso de sustancias con estructura química parecida, la corteza olfatoria debe «separar» las señales de entrada afines con el objetivo de evaluar estos estímulos como distintos. En el supuesto del mismo aroma en diferentes concentraciones, la corteza olfatoria debe ignorar las disimilitudes de los patrones de actividad, de manera que pueda efectuar una suerte de ejercicio de «generalización»: solo de este modo pueden identificarse dos impresiones sensoriales distintas como idénticas. Quizás estos procesos puedan resultar triviales en una primera impresión, mas esconden complejas compensaciones en las que las células mitrales del bulbo olfatorio desempeñan una función principal.

En un inicio, las células olfatorias registran una fragancia, la cual, a su vez, activa una batería de células mitrales. Cada uno de estos elementos de conmutación del bulbo olfatorio transporta un fragmento de la información entrante. De este modo, el código neuronal de un aroma no se refle-

FOTOLIA / MEDIAMO

**Una sustancia olorosa, aunque se presente en diferentes concentraciones, activa la misma población de neuronas en el bulbo olfatorio**

**UN TOQUE DE DISTINCIÓN**
El aroma de un buen vino esconde diversas sustancias olorosas. Algunas de ellas, desconcertantes.




JOERN NIESSING / FMI

**OLER BAJO EL AGUA**
El sistema olfativo del pez cebra está formado por células olfatorias en las narinas, además de glomérulos, células mitrales y neuronas inhibidoras en el bulbo olfatorio, así como de otras áreas cerebrales de orden superior.

ja en el patrón de estimulación de neuronas aisladas, sino que resulta de la actividad coordinada de numerosas, en parte diseminadas, células mitrales que de este modo dan lugar al llamado código de población. Estos códigos asociados a sustancias con un parentesco químico notable se asemejan y se hallan intensamente correlacionados.

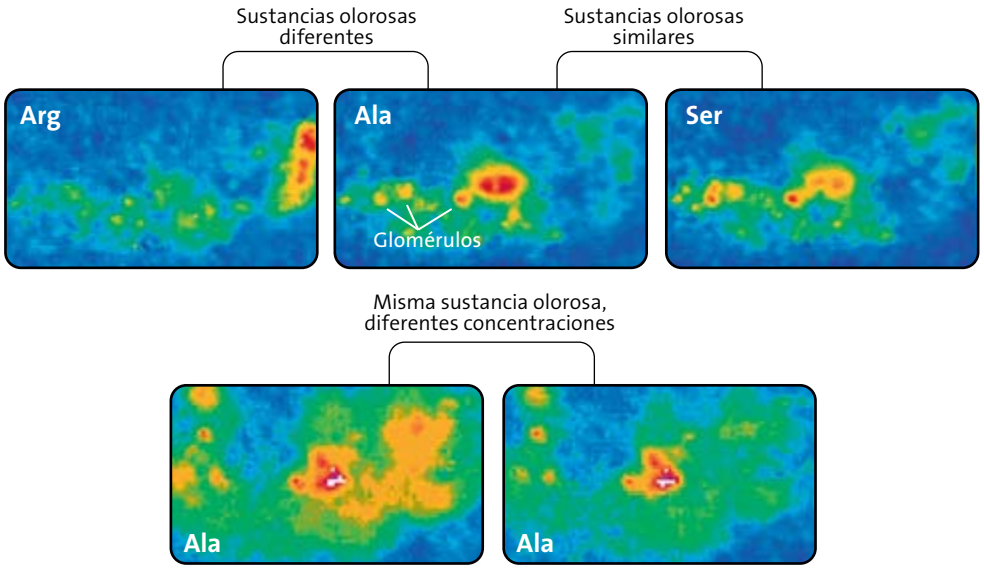
En 2001, Friedrich, junto con Gilles Laurent, del Instituto de Tecnología de California de Pasadena, revelaron la manera en que el bulbo olfatorio de los peces cebra diferenciaba patrones de actividad del mismo tipo. Según descubrieron, la red de conexiones de dicha región cerebral amplifica, en tan solo un segundo, las pequeñas diferencias en los patrones de población de las células mitrales. En el trascurso de esta descorrelación, las codificaciones de cada sustancia olorosa se separan, y los patrones, en un inicio parecidos, se vuelven discernibles unos de otros. El modo específico de cómo sucede tal fenómeno se desconoce por ahora. Suponemos que la clave radica en una complicada compensación entre las células mitrales excitatorias y las neuronas inhibidoras conectadas a ellas en la corteza olfatoria.

Resumiendo, la capacidad de distinguir aromas semejantes requiere un rendimiento elevado por parte la actividad cerebral. Sin embargo, dicho mecanismo presenta un problema: si la red de conexiones de la corteza olfatoria amplifica de manera permanente las pequeñas diferencias de actividad, los patrones de actividad de una misma sustancia en diferentes concentraciones deberían aumentar también. Entonces, ¿cómo puede percibirse un aroma que se presenta en distintas concentraciones como el mismo? ¿Acaso dispone la corteza olfatoria de dos rutas de procesamiento? ¿O quizá pueda una única red intensificar las leves diferencias de actividad de distintos aromas, a la vez que ignora las disimilitudes derivadas de la concentración de una misma sustancia?

## Las narinas bajo el microscopio

Con el fin de responder a esa serie de cuestiones, en 2010 medí junto con Friedrich la actividad de las células nerviosas del bulbo olfatorio del pez cebra. Para ello utilizamos la microscopía de excitación de dos fotones. Expusimos ante las narinas de los animales o bien el aminoácido lisina en cinco diferentes concentraciones o bien una sustancia con una composición química emparentada, la arginina. El resultado fue asombroso: a medida que los patrones de actividad asociados a ambas sustancias se iban diferenciando con rapidez (en una situación inicial eran muy similares), el có-

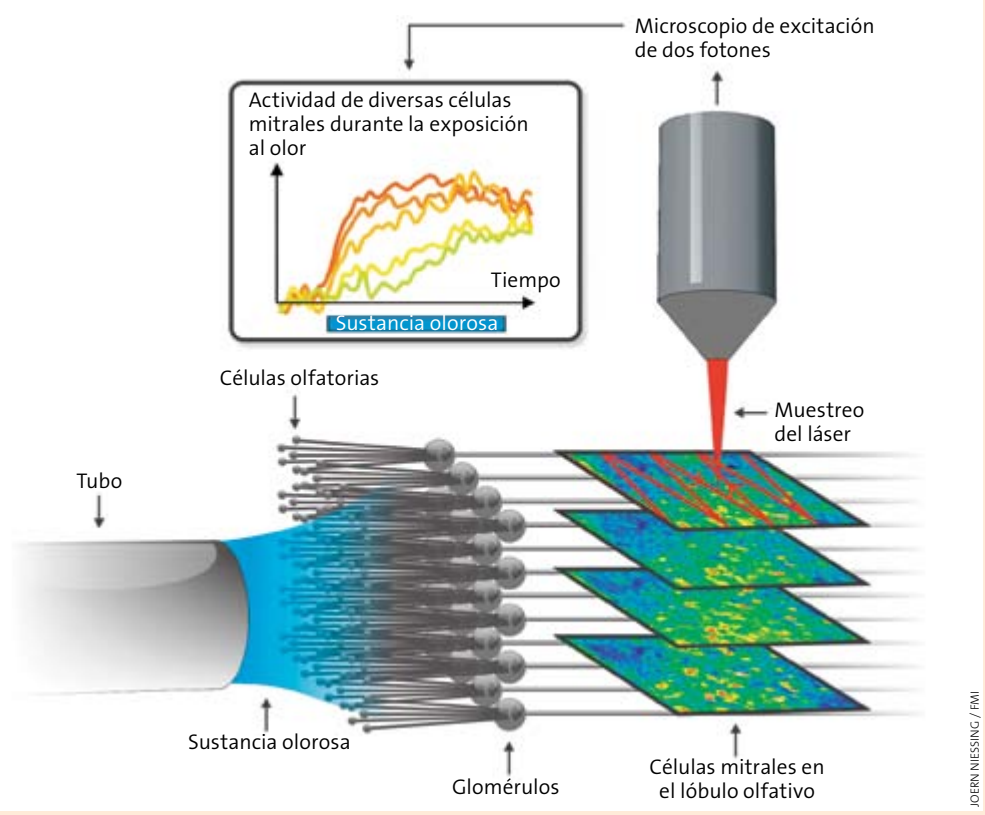
**PRECLASIFICACIÓN NEURONAL**
Los patrones de actividad de los glomérulos del bulbo olfatorio representan las propiedades químicas de las sustancias olorosas. Los aminoácidos arginina (Arg) y alanina (Ala) activan diversas regiones cerebrales; en el caso de la serina (Ser) se produce un patrón parecido a la alanina (*arriba*). Si se presenta la misma sustancia en concentraciones distintas, los patrones de actividad también se asemejan (*abajo*). De este modo se logra una categorización básica de las respectivas sustancias olorosas.




FUENTE: COMBINATORIAL AND CHEMOTOPIC ODORANT CODING IN THE ZEBRAFISH OLFACTORY BULB. VISUALIZED BY OPTICAL IMAGING. R. W. FRIEDRICH Y S. I. KORSCHING EN *NEURON*, VOL. 18, Nº 5, 1997. IMPRESO CON PERMISO DE ELSEVIER / CCC

## Tras la pista a los olores

**Los patrones de actividad en el bulbo olfatorio** se miden a través de la microscopía de excitación de dos fotones. Esta técnica permite una potente ampliación de la imagen de las células; además, indica el patrón de actividad eléctrico de numerosas neuronas a la vez. Se colocan los bulbos olfatorios diseccionados de pez cebra bajo el objetivo del microscopio; mediante un tubo se hace llegar la fragancia. Antes y durante la simulación de olores (unos tres segundos), el láser escanea las células mitrales, de manera que refleja su actividad. Como el microscopio ejecuta diversas tomas consecutivas, registra las variaciones temporales de la actividad neuronal.




**La red neuronal del bulbo olfatorio crea un nuevo olor a partir de dos sustancias aromáticas**

digo de población producido por la lisina apenas variaba cuando las áreas de concentración eran muy grandes. Demostramos que una sustancia olorosa, aunque se presentase en diferentes concentraciones, activaba las mismas poblaciones de neuronas; en cambio, aromas distintos que en un inicio estimulaban las mismas neuronas al final acababan excitando grupos distintos.

En conclusión, la red del bulbo olfatorio trabaja a través de ambos mecanismos: puede separar o generalizar según sea necesario.

No obstante, esta capacidad parece limitada. Aunque las células mitrales respondieron ante concentraciones distintas de la sustancia aromática de manera similar, las altas concentraciones de lisina desencadenaban patrones de actividad que se diferencian de los correspondientes a concentraciones más bajas, como si de un nuevo olor se tratase. Ello puede explicar el porqué de que una sustancia en concentraciones distintas, pero que percibimos en un inicio igual, nos huela diferente en cuanto aumenta su concentración. La mercaptometilpentanona, sustancia que, recuérdese, puede oler a orín de gato según su concentración, regala al vino una deliciosa fragancia a grosella negra si se utiliza en alta disolución.

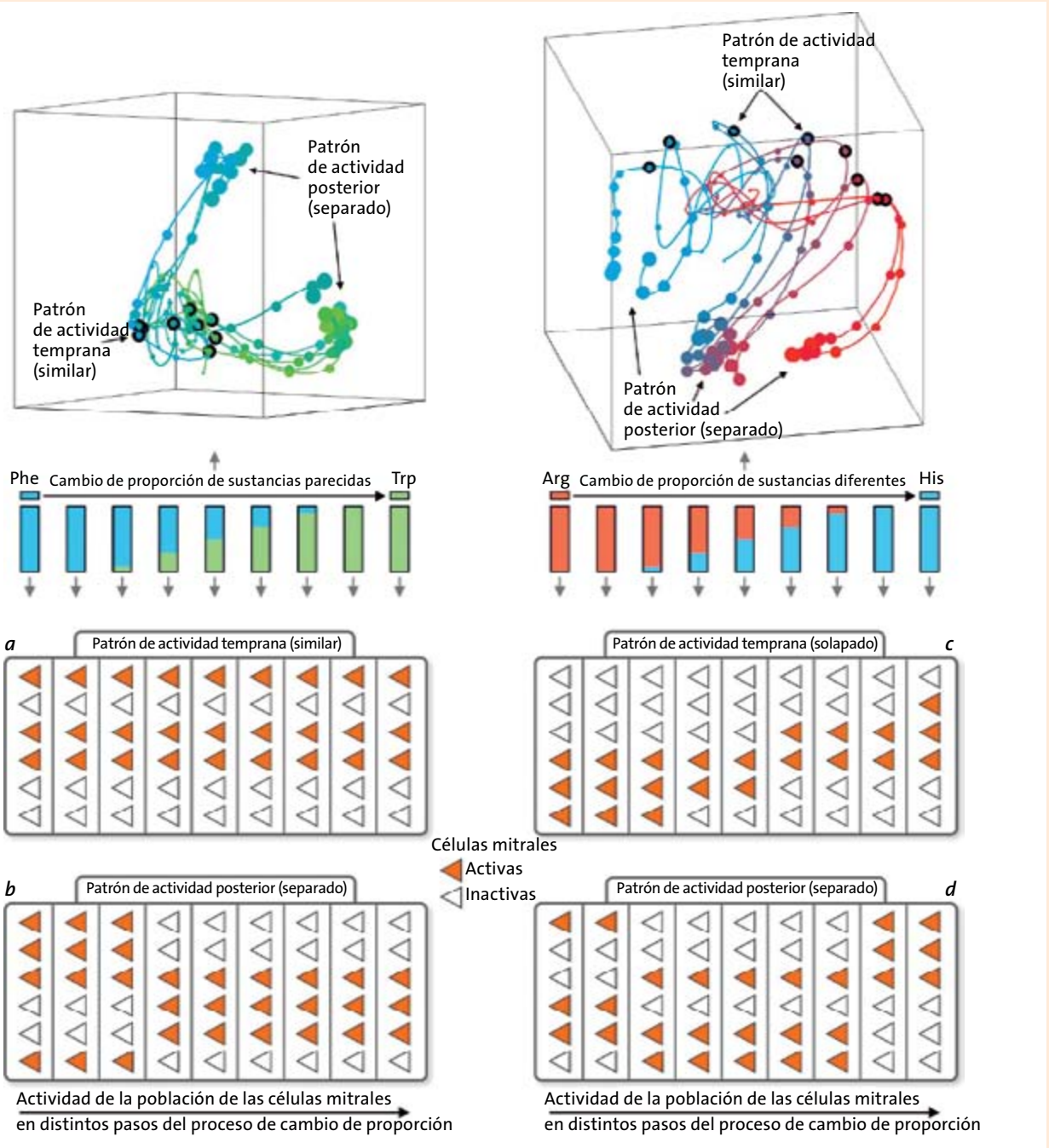
¿Cómo gestiona el cerebro la respectiva generalización o separación? Para averiguarlo, presentamos a los peces cebra mezclas aromáticas: en nueve ocasiones redujimos la concentración del aminoácido fenilalanina a la vez que aumentamos la presencia de triptófano, una sustancia quí-

## El interruptor de la corteza olfatoria

**A fin de investigar la reacción del bulbo olfatorio** ante combinaciones aromáticas diversas, mezclamos en nueve pasos el aminoácido fenilalanina (Phe) con el triptófano (Trp), sustancias químicamente emparentadas. Al principio, la respuesta de las células mitrales fue similar (*a*). Sin embargo, a partir de una determinada proporción de mezcla de ambas sustancias, el patrón de actividad se balanceaba entre el estado inicial y otro distinto (*b*).

En cambio, al combinar aminoácidos olorosos discernibles —arginina (Arg) e histidina (His)—, surgieron patrones de actividad diferentes (*c*) desde fases tempranas. Más adelante se formó incluso un tercer estado, como una especie de mezcla virtual de olores (*d*).

En los diagramas, la posición de los círculos (*arriba*) simboliza la variación del estado correspondiente. En sustancias con estructura química parecida se generan, a partir de patrones de actividad similares, dos estados discernibles a medida que pasa el tiempo (*izquierda*). En cambio, los patrones de actividad que originaba la mezcla de dos sustancias diferentes y que en un inicio se solapaban, se separan finalmente en tres (*derecha*).




JOERN NIESSING / FMI

mica emparentada. Era como si «mutásemos» los olores. La gran pregunta consistía en saber cuándo y cómo se modificaba el patrón de actividad de las células mitrales. ¿Siguen acaso las neuronas la alteración progresiva de las concentraciones de la mezcla? A este respecto, el equipo de Upinder Bhalla, del Centro Nacional de Ciencias Biológicas en Bangalore, constató en 2008 a través de la experimentación en ratas una adaptación progresiva del umbral de estimulación.

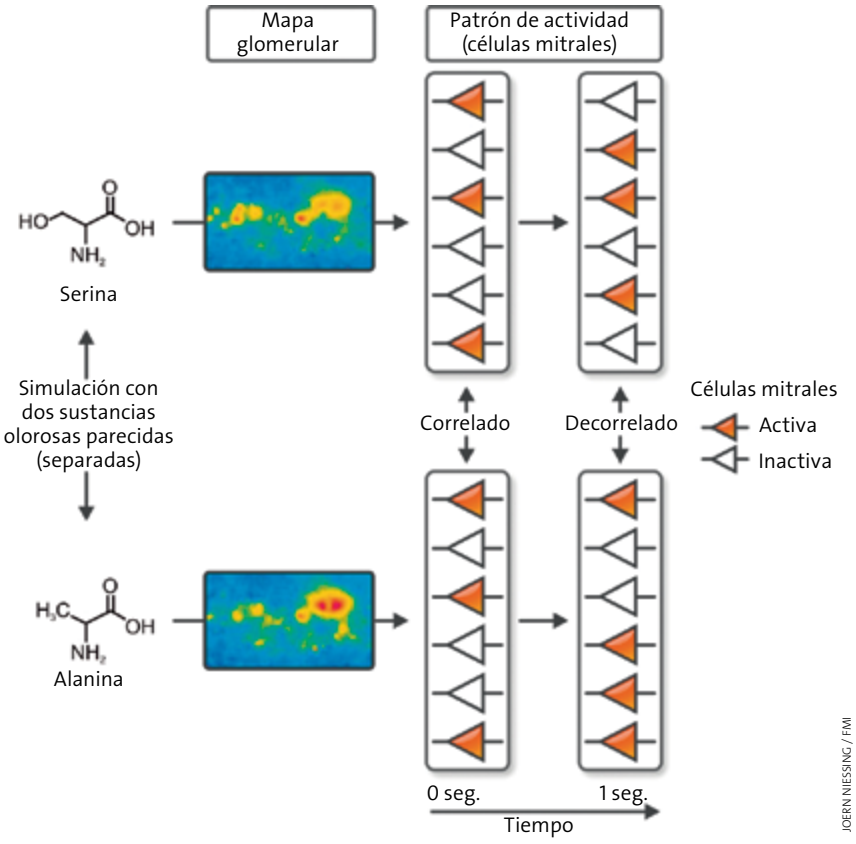
Volvamos a nuestro laboratorio. Las respuestas de los grupos de células mitrales a las combinaciones de fenilalanina y triptófano se presentaban al principio harto parecidas. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, el comportamiento de la neurona se invertía. Se generaron dos patrones de actividad que se diferenciaban entre sí: uno representaba el olor de la fenilalanina; el otro reflejaba la presencia de triptófano. Esta transición ocurría de manera abrupta. Al parecer, ante una variación de las proporciones de las sustancias de una mezcla, el bulbo olfatorio actuaba como si de un mecanismo basculante se tratase: iba de aquí para allá entre dos condiciones posibles.

## Aromas virtuales

Ni por asomo nos esperábamos este resultado, pues sugería una novedosa forma de entender el procesamiento de la información sensorial por parte del sistema olfativo. Según nuestros resultados, el bulbo olfatorio, además de gestionar las mezclas de aromas, omite, dependiendo de la proporción de la mixtura, una de las sustancias olorosas del patrón de población que, en un inicio, comparten ambas sustancias. Al parecer, el pez solo percibe uno de ambos aromas en cada ocasión; nunca los dos a la vez. De la misma forma, las personas solo captamos un par de los varios centenares de fragancias que posee una rosa (como el característico geraniol).

¿Qué sucede en el caso de combinaciones de sustancias olorosas diferentes? A fin de descubrirlo, mezclamos de forma progresiva los aminoácidos arginina e histidina. Como cabía esperar, las células mitrales respondieron desde un buen principio de manera diferenciada. Esta disparidad se acentuaba paulatinamente; el bulbo olfatorio conmutaba de forma abrupta también en esta ocasión. Para nuestra sorpresa, en esta situación, la red de conexiones no conformaba dos estados de población, sino ¡tres! Junto a los patrones de población correspondientes a los aromas arginina e histidina, aparecía uno distinto. La red había creado a partir de dos sustancias olorosas independientes un aroma nuevo.

La olfacción resulta vital para numerosos animales: les permite detectar la comida, les advierte con antelación de la presencia de enemigos y desempeña una función destacada en la búsqueda de una potencial pareja durante la época de apareamiento. Sin embargo, los olores decisivos representan una mínima fracción del desbordante flujo oloroso que perciben, por lo que deben filtrarse las señales para quedarse con las más relevantes. Nuestro hallazgo de los principios de generalización y separación en este procesamiento parece revelar el modo en que el bulbo olfatorio reduce a lo esencial el torrente de informaciones olorosas que acceden a nuestro cerebro. Aun así, todavía no sabemos con certeza si estos mecanismos acontecen en los humanos. Dado que el bulbo olfatorio de las personas se asemeja, a grandes rasgos, al de los peces, es probable que el procesamiento de los aromas sea comparable.




**MAYOR PRECISIÓN DISCRIMINATORIA**
Las sustancias químicas emparentadas, como la serina y la alanina, resultan similares en los mapas glomerulares (*izquierda*). No obstante, en el transcurso de un segundo, las actividades de población de las células mitrales divergen. Esta descorrelación aumenta las diferencias entre los patrones (*derecha*).

*Jörn Niessing es doctor en biología. Investiga en el equipo de Rainer Friedrich, en el Instituto de Investigación Biomédica Friedrich Miescher en Basilea.*

### Para saber más

**Olfactory pattern classification by discrete neuronal network states.** J. Niessing y R. W. Friedrich en *Nature*, vol. 465, págs. 47-52, 2010.

**Information processing in the olfatory system of zebrefish.** R. W. Friedrichen en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 36, págs. 383-402, 2013.

# El origen de los olores

No solo en la nariz. Los receptores olfativos se alojan también en lugares insospechados del cuerpo humano; entre ellos, la próstata y el intestino grueso

HANNS HATT Y REGINE DEE

EN SÍNTESIS

### Por todo el cuerpo

1 Las personas poseemos alrededor de 1000 genes para los receptores olfativos, aunque solo funcionan 350 de ellos.

2 Se han descubierto genes activos para los receptores olfativos situados lejos de la nariz, en lugares como los riñones, los testículos o el intestino grueso.

3 Los nuevos hallazgos sobre la olfacción podrían abrir camino a medidas terapéuticas innovadoras.

Con cada inspiración nos llegan mensajes de nuestro entorno. Sea una rosa o una pieza de pescado podrido, la nariz registra las moléculas aromáticas y transmite al cerebro las informaciones pertinentes. Ello ocurre a la velocidad del rayo, a todas horas, y nos puede salvar la vida. Ante un incendio que se desata o un alimento en malas condiciones, nuestro sentido de la olfacción se adelanta incluso a los ojos o los oídos para avisarnos del peligro.

¿Qué sucede exactamente cuando olemos? El sentido del olfato se encuentra situado en un área de la mucosa de unos cinco centímetros cuadrados, en la parte más alta de las fosas nasales. Los humanos poseemos cerca de 10 millones de células nerviosas especializadas (células olfativas), cuyas prolongaciones alcanzan el bulbo olfatorio cerebral. Sin embargo, hasta hace poco seguían desconociéndose los procesos que discurren en estas células sensoriales.

Hoy sabemos que las sustancias olorosas se unen a moléculas receptoras de la membrana celular en las células olfativas. Después de años de experimentación, Linda Buck y Richard Axel, de la Universidad de Columbia, identificaron en 1991 los genes que codifican estos receptores olfativos [*véase* «Biología molecular de la olfacción», por Richard Axel; Investigación y Ciencia, diciembre de 1995]. Años más tarde, en 2004, recibieron el premio Nobel de medicina por su descubrimiento.

En 1984, tras cursar las carreras de psicología y microbiología, Buck entró como joven ayudante en el laboratorio de Axel. Este pionero en biología molecular no se había ocupado en ningún momento de la olfacción; sin embargo, se dejó convencer por la idea de Buck de buscar los códigos estructurales de los receptores olfativos, es decir, desentrañar un misterio aún por resolver. La investigadora estaba convencida de que las moléculas olorosas y sus receptores interactuaban de forma similar a la manera en que lo hacen las hormonas con sus receptores. En este último caso, los códigos constructivos ya se conocían.

Buck comenzó a buscar genes que guardaran cierta semejanza con los de los receptores hormonales: siete segmentos del ADN debían codificar las regiones hidrófobas (las que repelen el agua) de la proteína receptora; estas regiones son características de las proteínas ancladas a la membrana celular. Además, como los hormonales, estos receptores debían contar con lugares de unión para las proteínas G, que amplifican la señal de entrada y la retransmiten dentro de la célula. Dada la enorme multitud de aromas, Buck partió de la base de que debían existir múltiples códigos constructivos ligeramente distintos de estos receptores; en pocas palabras, una «familia de genes».

La tarea se planteaba ardua, como buscar una aguja en un pajar. Por entonces no se había descifrado la dotación hereditaria de ningún animal ni existían máquinas que permitieran el análisis automático de los genes. La joven científica debía investigar cada muestra de ADN a partir de un minucioso trabajo manual.

Durante años, Buck investigó en vano. Incluso estuvo a punto de tirar la toalla en 1990. Entonces sucedió algo imprevisto: descubrió en el genoma de la rata una familia gigante de genes con más de 1000 miembros que cumplía todos los requisitos postulados.

Mas ¿eran realmente estos genes los responsables de codificar los planes constructivos durante tanto tiempo buscados? Para demostrarlo, debía obtenerse una proteína codificada por uno de esos genes y comprobar que reconocía las sustancias olorosas. Comenzaba una carrera emocionante. ¿Qué investigador sería el primero en alcanzar la meta?

**SIN DESCANSO**
Nuestro sentido olfativo trabaja de día y de noche. Mientras que la visión descansa durante el sueño, el sentido de la olfacción funciona las 24 horas. Tampoco puede desconectarse de forma voluntaria.

FOTOLIA / MEDDY POPCORN

Numerosos laboratorios de diversas partes del mundo se sumaron a la pesquisa. Cada uno con una técnica distinta, también con genes de animales diferentes. Sin embargo, la aventura comenzó con el fracaso como compañero de fatigas. Hubieron de transcurrir varios años hasta que nuestro equipo de la Universidad Ruhr de Bochum identificara, junto con el grupo de Stuart Firenstein, de la Universidad de Columbia, los primeros receptores olfativos. Corría el año 1998. Los colegas de Estados Unidos pusieron la mira inicial en los receptores de rata; nosotros, en los del pez cebra y el ser humano.

Se sabía que las personas, al igual que los ratones, poseen alrededor de 1000 genes para los receptores olfativos, aunque solo funcionan 350 de ellos. El resto ha quedado silenciado a lo largo de la evolución. Cuando una proteína no ofrece ninguna ventaja para la supervivencia, el gen correspondiente, en vez de desaparecer de la dotación hereditaria, se desactiva. De este modo, la especie humana ha ido acumulando de forma paulatina cerca de un millón de genes, de los que solo aprovecha un 3 por ciento.

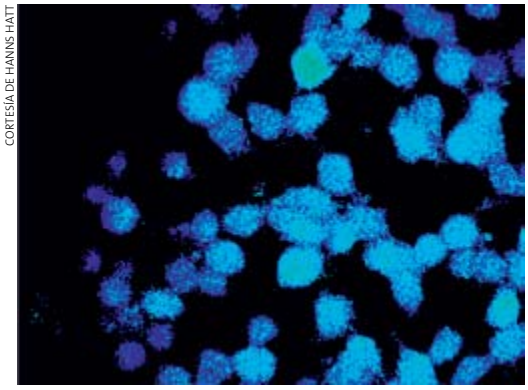
Los 350 genes de los receptores olfativos se hallan repartidos por todos nuestros cromosomas, con excepción del 20 y del cromosoma sexual masculino Y. A pesar de que su número resulta más reducido en los humanos en comparación con los roedores, los planos constructivos de los receptores olfativos representan la familia génica más numerosa de nuestro genoma. Sin duda, la olfacción continúa siendo importante para los humanos.

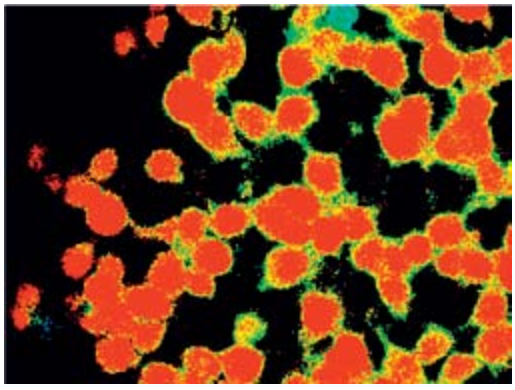
En Bochum sospechábamos que las tentativas fallidas respondían a que los receptores, fabricados sin ningún problema, no se habían incorporado de manera correcta a la membrana. Otro descubrimiento nos alentó: las células disponían de un sistema refinado para el transporte de las proteínas. El destino celular de una proteína aparece registrado en una especie de pegatina con dirección y código postal, y nuestro equipo había descifrado un «código postal» para un receptor hormonal que se asentaba en la membrana celular.

## Células olfativas en los riñones

De entre los 350 posibles genes de los receptores escogimos, por casualidad, el número 40 del cro-

CORTESÍA DE HANNS HATT





**EN ROJO**
Las células renales, que contienen el gen del receptor olfativo humano OR17-40, reaccionan a la sustancia aromática helional. La concentración de iones de calcio en las células aumenta tras el contacto con el compuesto químico, reacción que se visualiza con ayuda del pigmento Fura 2 (*imagen inferior*).

mosoma humano 17. Lo bautizamos OR17-40. A continuación, lo marcamos con el código postal del receptor hormonal, confiados en que, de este modo, se incorporaría a la membrana celular. Para ello, lo implantamos en células cultivadas de riñón humano. Luego observamos si estas células respondían a nuestra mezcla de 100 aromas. Si las células renales, que no producen receptores olfativos por sí mismas, reaccionaban, sería debido al receptor que habíamos introducido. Como la estimulación aumenta la concentración de iones de calcio de las células, utilizamos el pigmento reativa Fura 2, que actúa con los iones de calcio, para comprobarlo. Si la concentración es baja, dicho tinte aparece azul sobre la pantalla del ordenador; en cambio, si es alta, se torna rojo, lo que reflejaría la existencia de una estimulación celular.

Al fin logramos observar en tiempo real cómo las células renales adquirían una tonalidad claramente roja. Al examinar cada una de las sustancias olorosas de la mezcla, nos topamos con una nueva sorpresa: solo uno de los aromas activaba la célula; los 99 restantes, no. Se trababa del helional, sustancia que huele a brisa fresca de mar. Por fortuna, el químico encargado de la mezcla incluyó esta fragancia en el muestrario oloroso; de lo contrario, quizá seguiríamos buscando.

Con la miel del triunfo en los labios, empezamos enseguida a examinar otro receptor humano, el cual escogimos de nuevo al azar: el número 4 del cromosoma 17, es decir, el OR17-4. Nuestra alegría alcanzó su apogeo al comprobar que la mezcla funcionaba también en esta ocasión. Solo uno de los 100 aromas, el ciclamal, que huele a lirio de los valles, activaba las células. Habíamos descubierto los primeros dos genes de receptores olfativos humanos.

¿Reacciona cada receptor a una molécula aromática específica? ¿Cómo podía descubrirse, a partir de los 350 tipos de receptores, el espectro de sustancias olorosas que es capaz de percibir una persona? Nuestra siguiente misión radicaba en probar con el receptor OR17-4 moléculas aromáticas de estructura parecida al ciclamal. Observamos que numerosas de ellas excitaban asimismo al receptor. La mayoría llevaban a cabo tal reacción con menor intensidad, aunque algunas aumentaban su respuesta, en especial el bourgeonal y el lilial, dos sustancias sucedáneas del lirio de los valles que suelen utilizarse en la industria de limpieza. De este modo, cada receptor reaccionaba a una determinada estructura, que necesariamente se hallaba presente en la molécula olorosa. El resto podía variar, aunque no demasiado. Aparte del OR17-40 y el OR17-4, hasta 2010 se descifraron otros cinco receptores en humanos, cuatro de ellos en nuestro laboratorio. Estos últimos responden al aroma de las violetas, los plátanos, los limones, el sudor y la orina.

Ya que cada célula posee, en principio, la misma dotación genética, dimos la vuelta a la pregunta: ¿podrían existir otros tejidos, cuyos genes para los receptores olfativos codificaran las proteínas correspondientes? Es posible que estos receptores no se comportaran como antenas aromáticas, sino más bien como un sensor químico de carácter universal. Marc Parmentier, de la Universidad Libre de Bruselas, había descubierto en 1992 indicios de la existencia de genes activos para los receptores olfativos situados lejos de la nariz, en concreto, en los testículos. Sin embargo, durante largo tiempo no se sabía si se trataba de genes funcionales.

Llegados a este punto, nos interesaba conocer en qué células del tejido testicular se encontraban los receptores para la olfacción y qué hacían precisamente en ese lugar. Quizás estos receptores nos revelarían el modo en que los espermatozoides

logran superar el largo camino hasta el útero y localizar allí el diminuto óvulo.

De nuevo, la suerte nos sonrió. Justo por entonces habíamos identificado un segundo receptor olfativo humano en la nariz (el OR17-4); por otro lado, una investigadora estudiaba en esos momentos los receptores olfativos en el tejido testicular humano. Se le ocurrió que uno de estos receptores era idéntico al OR17-4.

## En busca de la nariz primitiva

Los espermatozoides pueden «oler» el lirio de los valles, nos dijimos. Para comprobarlo, usamos espermatozoides frescos y vivos y, de nuevo, Fura 2 para saber si una célula se estimulaba. El pigmento viraba al rojo si añadíamos bourgeonal. En consecuencia, los gametos masculinos reaccionaban al olor del lirio de los valles. Con todo, se desconoce si, en el curso de la evolución humana, los receptores olfativos emigraron de la nariz a los testículos o a la inversa. Sospechamos que la «nariz primitiva» podría residir en los espermatozoides. Al fin y al cabo, la reproducción siempre ha sido más importante que la olfacción.

¿En qué otros lugares del cuerpo podrían ocultarse los receptores olfativos? A raíz de los resultados de la investigación con los espermatozoides, llegamos a la idea de examinar un tejido emparentado: la próstata. Otros científicos habían destapado pistas de la existencia de un receptor en dicha glándula, el cual, por entonces desconocido, se produce en grandes cantidades, sobre todo en el caso de cáncer prostático. Dicho «detector» olfativo descubierto en la nariz y conocido bajo las siglas de PSGR (del inglés, *prostate specific G-protein receptor*), responde al aroma de la violeta. En nuestros experimentos, las células prostáticas reaccionaron a este compuesto aromático.

En este contexto, hemos identificado la molécula fisiológica activadora. Se trata del esteroide dihidrotestosterona (DHT), un producto metabólico de la hormona sexual masculina testosterona y cuya estructura química se parece a la del aroma de la violeta. Sin embargo, los receptores de la próstata no se utilizan de forma natural para la olfacción, antes bien ponen en marcha una vía señalizadora muy diferente. Esta destina el mensaje al núcleo celular con el fin de ajustar de inmediato la división celular.

Ese hallazgo captó nuestra atención, pues lo que ocurre con las células prostáticas sanas también podría valer para las células cancerosas que, además, producen ese receptor en grandes cantidades. Una clínica urológica nos proporcionó células de carcinoma de próstata, a las que añadimos bien aroma de violeta o bien el producto de degradación de la testosterona. Al cabo de 24 horas, observamos una detención casi completa de la división de las células carcinomatosas. Ello podría constituir un nuevo y prometedor método para el tratamiento del cáncer. No obstante, se precisan más años de experimentación y desarrollo para la aplicación clínica de estos resultados.

En 2007, el equipo de Manfred Gratzl, de la Universidad Ludwig Maximilian, descubrió que los receptores para el aroma de la brisa fresca del mar y del lirio del valle se hallan también en células del intestino grueso humano. Cuando se activan los receptores con la sustancia olorosa correspondiente, las células liberan serotonina que modifica las contracciones musculares a través del sistema nervioso autónomo intestinal. De esta manera, los aromas que contienen los alimentos podrían estimular o calmar el intestino. Estos hallazgos beneficiarían a las personas que sufren de alguna enfermedad intestinal de origen incierto, ya que, según los resultados, las moléculas aromáticas que llegan al intestino a través de la alimentación podrían modificar la composición de las secreciones digestivas a través de los receptores.

Sin duda, tales descubrimientos abren las puertas a un paisaje novedoso del sentido de la olfacción, pues demuestran que una variedad de órganos de nuestro cuerpo, no solo la nariz, intervienen en la percepción de estímulos químicos olorosos. Por su parte, estas sustancias mensajeras se encuentran repartidas por todo el organismo humano: en los tejidos, en la sangre y en otros fluidos corporales, desde la saliva pasando por el jugo gástrico hasta la orina y las secreciones vaginales.

¿En qué lugar del cuerpo volveremos a toparnos con receptores olfativos? De momento, los hemos localizado en el músculo, la piel, el cerebro, entre otros tejidos, pero sus funciones se desconocen por ahora. No obstante, pueden descubrir vías terapéuticas innovadoras para algunas enfermedades. Los investigadores de la olfacción deberían asomar la nariz por otros terrenos.

***Hanns Hatt**, biólogo y médico, trabaja como profesor de biología celular en la Universidad Ruhr de Bochum.*
***Regine Dee** es redactora científica.*

### Para saber más

**A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor reception.** L. Buck y R. Axel en *Cell*, vol. 65, págs. 175-187, 1991.

**Specificity and sensitivity of a human olfactory receptor functionally expressed in human embryonic kidney 293 cells and xenopus laevis oocytes.** C. H . Wetzel et al. en *Journal of Neuroscience*, vol. 19, págs. 7426-7433, 1999.

**Identification of a testicular odorant receptor mediating human sperm chemotaxis.** M. Spehr et al. en *Science*, vol. 299, págs. 2054-2058, 2003.

**El olfato.** H. Hatt en *Mente y cerebro*, n.º 11, 2005.

**Enterochromaffin cells of the human gut: sensors for spices and odorants.** T. Braun et al. en *Gastroenterology*, vol. 132, n.º 5, págs. 1890-1901, 2007.

**Functional expression of a mammalian odorant receptor repertoire.** H. Zhao et al. en *Science*, vol. 279, págs. 237-242, 2008.

**Activation of an olfactory receptor inhibits proliferation of prostate cancer cells.** E. M. Neuhaus et al. en *Journal of Biological Chemistry*, vol. 284, n.º 24, págs. 16.218-16.225, 2009.

**Niemand riecht so gut wie du. Die geheimen Botschaften der Düfte.** H. Hatt y R. Dee. Piper, Múnich, 2010.

**Physiologie des Riechens und Schmeckens.** H. Hatt en *Käsebrot mit Marmelade: Geschmack ist mehr als schmecken.* Fundación Dr. Rainer Wild-Stiftung, págs. 81-101, 2013.

# Cuestión de gustos

*¿Sushi* o carne a la brasa? Según los fisiólogos sensoriales, la elección del menú no depende solo de las experiencias y el entorno cultural. Las personas divergimos en los gustos culinarios porque percibimos los sabores de forma distinta

ANGELIKA BAUER-DELTO

GEHRN UND GEIST / GETTY IMAGES / UWE UMSTAETTER

Celebración en casa. A un invitado le apetece el pastel de nata, al otro las patatas fritas. Unos se conforman con una ensalada fresca y otros se decantan por los canapés de *foie gras*. Es sabido que los gustos varían de una persona a otra, pero ¿por qué?

A menudo, las preferencias gastronómicas en la adultez vienen marcadas desde la tierna infancia. Según el equipo liderado por Julie Mennella, del Centro de Sentidos Químicos Monell de Filadelfia, el aroma de la leche materna influye en los gustos futuros: los niños cuya progenitora acostumbraba a beber zumo de zanahoria durante el embarazo mostraban una predilección mayor por las papillas de cereales con aroma de zanahoria en comparación con los pequeños que no habían probado antes este sabor.

**MMM...**
Los genes influyen en la predilección que los niños sienten por el sabor dulce.

También el aprendizaje influye en el desarrollo de preferencias gustativas. Cuando un alimento nos sacia y además contribuye a nuestro bienestar (por ejemplo, una tableta de chocolate), su aroma se «almacena» en ciertas redes neuronales del cerebro. Como consecuencia, volvemos a recurrir con especial apetencia a ese bocado. Si, por el contrario, sentimos malestar después de una comida, relacionamos su sabor con la idea de enfermar, por lo que evitamos ingerir ese alimento en futuras ocasiones. Esta conducta alimentaria se ha desarrollado a lo largo de la evolución humana y nos protege de los víveres en mal estado o todavía inmaduros para su consumo.

Para apostar por lo seguro, podríamos comer cada día carne empanada y patatas fritas, alimentos que por experiencia y por lo general nos satisfacen, aunque corramos el riesgo de padecer desnutrición. Sin embargo, las personas no solemos llegar a tales extremos. Antes de incurrir en esta conducta aparece una señal de saturación sensorial que nos reprime. De repente, deja de gustarnos nuestro plato favorito y nos apetece cambiar de menú. Gracias a este mecanismo biológico, las personas tienden a acogerse a una dieta variada.

Ya lo dice el refrán: «Más vale malo conocido que bueno por conocer». Cuando topamos con alimentos desconocidos, solemos contemplarlos con escepticismo. Este miedo innato, que recibe el nombre de neofobia, nos abstiene de probar una fruta exótica sin la precaución de degustar primero una pequeña porción y aguardar a que el cuerpo reaccione.

Las preferencias gustativas también se transmiten de un alimento a otro. Mostramos una mayor disposición a aceptar nuevos platos si estos se combinan con productos que nos son conocidos y nos gustan. Se trata del aprendizaje sabor-sabor.

No obstante, existen alimentos que requieren un proceso de familiarización. Como sucede con el café. Cuando se bebe por primera vez, no resulta extraño que se pida más leche o azúcar para disimular su sabor amargo; incluso surge la pregunta de por qué tanta gente elige esta infusión para desayunar o rematar un sabroso almuerzo. Poco a poco, sin embargo, aprendemos a valorar esta bebida estimulante.

¿Cómo distinguimos los aromas? Cuando nos entusiasma el sabor de una comida, no nos basamos solo en la información gustativa que percibimos mediante la lengua. Aunque a través de ella diferenciamos el dulce, el ácido, el salado, el amargo y el umami (del japonés *umai*, es decir, «sabroso»), los millones de aromas que somos capaces de distinguir los apreciamos, sobre todo, a través de la mucosa nasal. Asimismo, el nervio trigémino, que se ramifica entre otros lugares por el rostro, percibe diversas sensaciones: burbujeo, picante, ardiente y punzante. También el tacto y el oído aportan información sobre las características del alimento: las patatas fritas son angulosas y crujen al masticarlas, mientras que las gominolas son blandas, viscosas e «insonoras». Todo ello contribuye a que creemos una imagen sensorial compleja de la comida que ingerimos.

## Comandos especiales en la lengua

Las sensaciones gustativas se transmiten por quimiorreceptores. Estos se hallan en las papilas gustativas con forma de cebolla alojadas tanto en la lengua como en la parte posterior del paladar y la superior del esófago. Las células sensoriales que conforman la papila contienen receptores gustativos, unas proteínas especiales que absorben aromas disueltos en la saliva. Cuando una molécula de azúcar activa uno de estos receptores, el cerebro recibe la información de dulzor mediante la transducción de una señal a través de fibras nerviosas sensoriales.

Los receptores de la familia $TAS_1$, específicos del sabor dulce y el «sabroso», se clasifican en diversos subgrupos. $TAS_1R_1$ y $TAS_1R_3$, que reaccionan de manera conjunta ante el glutamato (un aminoácido que se utiliza en saborizantes como los cubitos Maggi), se activan para el umami. $TAS_1R_2$ y $TAS_1R_3$, sensibles a los azúcares, aminoácidos y proteínas, se activan para el sabor dulce.

Las «antenas» moleculares gustativas $TAS_2R$ reaccionan ante las sustancias amargas. En la actualidad se conocen 25 variantes; cada una reconoce un elemento distinto. El receptor $TAS_2R_38$ detecta solo una clase de moléculas que se encuentran en el brócoli o la col lombarda. El $TAS_2R_16$, por otra parte, está especializado en sustancias que contienen las almendras amargas.

El sabor de comidas saladas o ácidas se percibe merced a los canales iónicos de las membranas celulares. En cuanto discurren a través de ellas partículas con carga eléctrica, caso de un ion de

AUTOTEST

### ¿A qué sabe?

Tápese la nariz y chupe un caramelo con sabor a fruta. Es probable que no perciba más allá de un sabor dulce. Destápese la nariz; sienta ahora el aroma de la fruta.

Explicación: los receptores gustativos de la lengua funcionan con el azúcar, sin embargo, los aromas frutales los registra la mucosa nasal. Por ello, solo los percibimos si tenemos la nariz destapada.

EN SÍNTESIS

### ¡Qué rico!

1 Las preferencias y aversiones gustativas surgen de una compleja combinación entre las experiencias durante la infancia, las costumbres sociales y los mecanismos biológicos.

2 La percepción de las cualidades gustativas depende de la dotación genética de cada persona.

3 Factores físicos y psíquicos influyen también en la percepción de los diversos sabores y los alimentos preferidos.

## El dulce en los genes

Debido a una variante genética, los europeos perciben el dulce con mayor intensidad que los asiáticos o los africanos. Una pequeña diferencia genética es la causante del mayor desarrollo de receptores de hidratos de carbono.

(«Allelic Polymorphism within the $TAS_1R_3$ Promoter Is Associated with Human Taste Sensitivity to Sucrose». A. Fusham et. al. en *Current Biology*, vol. 19, págs. 1288-1293, 2009.)

sodio de la sal común, se liberan transmisores químicos. Ante las cantidades de cloruro sódico que condimentan un plato, se activa el canal de sodio epitelial (ENaC). Un equipo liderado por Charles Zuker, de la Universidad de California en San Diego, describió dicho fenómeno hace unos dos años al desactivar dicho canal con un «truco» bioquímico en unos ratones. De golpe, los roedores perdieron el interés por la comida salada.

### Demasiada sal

Sin embargo, parece que el ENaC no está especializado en concentraciones de sal que resultan desagradables al paladar. Los múridos a los que se había desactivado el canal de sodio epitelial seguían reaccionando con aversión ante alimentos demasiado salados. Hoy por hoy, se desconoce el receptor responsable de detectar altas concentraciones de sal en la comida.

¿Cómo percibimos el ácido de una rodaja de limón? Si bien se ha demostrado que las células que reaccionan ante un sabor ácido presentan el canal de iones $PKD_2L_1$ y que dicha sensación desaparece cuando este se bloquea, su proceso exacto continúa siendo un enigma.

Wolfgang Meyerhof, del Instituto Alemán de Investigación Alimentaria de Potsdam-Rehbrücke, y sus colaboradores descubrieron en 2011 que, además del dulce, el ácido, el salado, el amargo y el umami, distinguimos otro aspecto gustativo: la calidad de graso. Esta última percepción se relacionaba hasta ahora con una sensación blanda y cremosa en boca. No obstante, el equipo de Meyerhof comprobó que somos capaces de apreciar pequeñas concentraciones de ciertos ácidos grasos en un alimento. Los investigadores desarrollaron una lengua artificial con la que averiguaron que los ácidos grasos activan el receptor $GRP_{120}$.

La percepción de cualidades gustativas guía el comportamiento alimentario de los humanos: un sabor dulce indica comida energética en forma de hidratos de carbono; el umami apunta a un alto contenido de proteínas. Puesto que ambos sabores se perciben como agradables, gustan las comidas nutritivas. Pero si esta tendencia resultaba muy útil para nuestros antepasados prehistóricos, no así para el ritmo de vida actual: hoy en día seguir una dieta de esas características puede perjudicar la salud. Para potenciar la ingesta de minerales y electrolitos vitales, también nos agradan los aromas ligeramente ácidos o salados. No obstante, cuando un alimento es ácido, salado o amargo en extremo, reaccionamos con repulsión. De este modo evitamos comer víveres en mal estado o venenosos.

La preferencia del dulce y la aversión a las sustancias amargas no solo se remontan a experiencias personales tempranas. En cierta medida, son innatas y universales. Mennella y su equipo observaron que un feto de ocho meses bebía con más frecuencia líquido amniótico dulce que si presentaba una nota amarga. Del mismo modo, la mayoría de los bebés responden con una expresión de satisfacción si se les ofrece una solución azucarada, sea cual sea el ambiente cultural en el que hayan nacido. Por el contrario, rechazan el sabor ácido y el amargo.

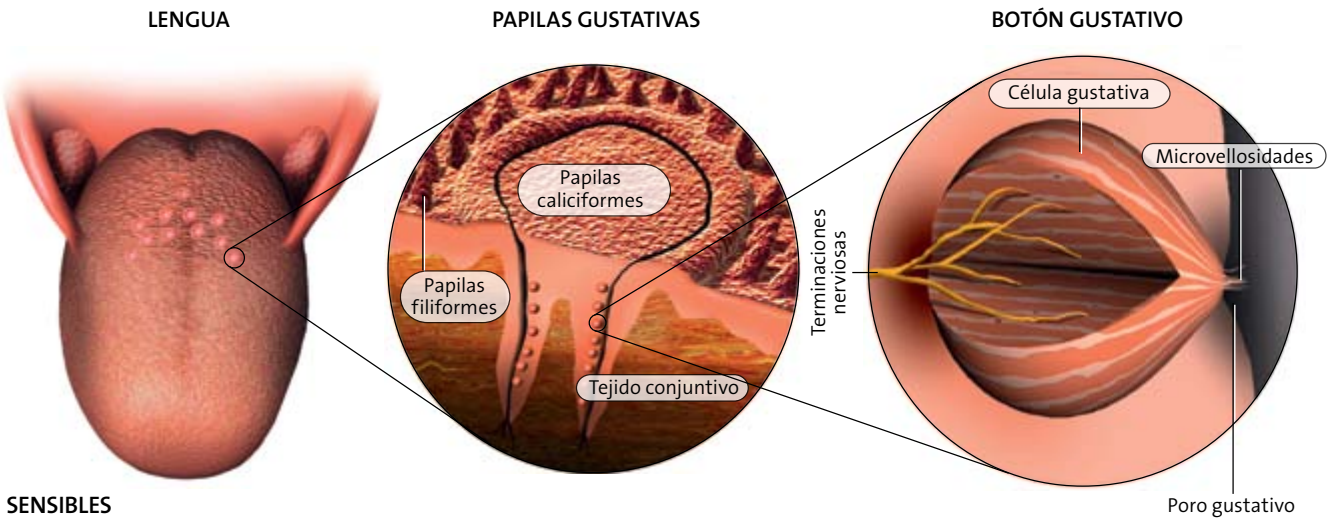
Varios estudios han demostrado, no obstante, que percibimos las cualidades gustativas de formas distintas debido a pequeñísimas variaciones en los genes que codifican los sensores gustativos correspondientes. Mennella comprobó que los niños entre cinco y diez años percibían las sustancias amargas con diferente intensidad según la variante del gen $TAS_2R_38$ que tuvieran. Cuanto más les gustaba el dulce, más sensibles eran al amargo.

La variante genética también influía en la percepción del sabor amargo en las madres,

## Menú personal

**La experiencia cotidiana** demuestra que las preferencias gustativas no siempre corresponden a lo que se ingiere. Una variedad de razones influyen en la elección del menú: algunas personas optan por desayunar una fruta y rechazan el pastelito de crema influenciadas por su elevada conciencia de vida saludable; el bolsillo obliga a otros a comprar gambas congeladas en lugar de frescas; y cuando triunfa el exotismo en el entorno social, un individuo puede elegir *sushi* para almorzar a pesar de que el pescado crudo no le acabe de convencer. En resumidas cuentas, el sabor no es siempre motivo de elección de una comida.

Según los primeros resultados de un estudio de la fundación Dr. Rainer Wild-Stiftung, organización dedicada al estudio de la buena alimentación, de vez en cuando consumimos alimentos que no nos apetecen. A través de una encuesta entre unas 1000 personas, los investigadores descubrieron que el 81% de los individuos ingiere a veces comida que no se corresponde a sus preferencias gastronómicas, que un 73% sigue comiendo aunque no le guste y que, de estos, un 40% se termina el plato casi o por completo. Los motivos de este comportamiento se están estudiando.




GEHIRN UND GEIST / MEGANIM

**SENSIBLES**
Las papilas gustativas de la lengua, perceptibles a simple vista, están formadas por varias células gustativas. Cuando una sustancia llega a las microvellosidades, la célula envía una señal eléctrica al cerebro.

aunque con menor fuerza. En cambio, su nivel de predilección por el dulce no se veía afectado. Ello apunta a que la dotación genética sobre las preferencias gustativas pierde peso con el paso de los años.

## De elevada amargura

Meyerhof y su equipo demostraron que algunas sustancias amargas activan solo variantes específicas del receptor $TAS_2R_38$, lo que explica en parte que haya personas que perciban más amargor en el brócoli y la col lombarda que otras.

Junto a la constitución genética, el estado físico y psíquico también determinan la percepción de las notas de sabor. El equipo de Ajmol Ali, del Instituto de Alimentación, Nutrición y Salud Humana de Auckland, reveló en 2011 que la percepción gustativa varía bajo un esfuerzo físico. Cuanto más tiempo llevaba un deportista entrenando sobre la cinta de correr, más dulces le parecían las bebidas energéticas, más sentía que le aliviaban la sed, más le agradaban y menos saladas las encontraba.

Lo mismo ocurre con el amor. Según descubrieron investigadores del Centro de Transferencia Tecnológica de Bremerhaven, para percibir el dulce o el amargo los recién enamorados necesitaban mayores concentraciones que las parejas que llevaban años de relación estable. Por el contrario, reaccionaban con más sensibilidad ante el ácido y el salado. Los investigadores conjeturan que las emociones positivas afectan al cóctel de hormonas corporal e influyen sobre la transmisión de impulsos nerviosos, provocando así una variación en la percepción.

En 2009, Lucy F. Donaldson, de la Universidad de Bristol, estudió junto con sus colaboradores si las percepciones gustativas afectaban al comportamiento alimentario. Evaluaron diversos artículos especializados que relacionaban el sobrepeso con una percepción alterada de los sabores. Según averiguaron, las personas con obesidad perciben el sabor dulce con menor intensidad y, por ello, toleran concentraciones de azúcar más altas que los sujetos con un peso normal.

Sin embargo, las conclusiones no resultan esclarecedoras. Parece que las personas obesas también son menos sensibles al sabor amargo y al ácido, aunque no al salado. La ciencia no puede explicar todavía los mecanismos biológicos que subyacen a la relación entre la masa corporal y las preferencias gustativas.

Sin duda, nos esperan nuevos hallazgos en este campo. Los investigadores acaban de iniciar un estudio sistemático de la interrelación entre la percepción gustativa y la alimentación. Es probable que los resultados contribuyan a la prevención de enfermedades relacionadas con la alimentación.

***Angelika Bauer-Delto*** *es periodista científica especializada en temas médicos.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 61

### Para saber más

**El sentido del gusto.** D. V. Smith y R. F. Margolskee, en *Los cinco sentidos*, Temas de IyC n. º 39, 2005.

**Taste and weight: Is there a link?** L. F. Donaldson et al. en *American Journal of Clinical Nutrition*, vol. 90, págs. 8005-8035, julio de 2009.

**Changes in sensory perception of sports drinks and post exercise.** A. Ali et al. en *Physiology & Behavior*, vol. 102, págs. 437-443, marzo de 2011.

**Innate and learned preferences for sweet taste during childhood.** A. K. Ventura, J. K. Mennella en *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, vol. 14, págs. 379-384, julio de 2011.

# No quiero sopa

¿Por qué a la mayoría de los niños les gustan las golosinas pero detestan la ensalada o las coles de Bruselas? ¿Se les puede enseñar a alimentarse de manera sana? ¿Cómo?

HERBERT RENZ-POLSTER

**NO, NO Y NO**
Incluso los niños pacíficos convierten la hora de la comida en una lucha interminable si no les gusta lo que hay en el plato.

FOTOLIA / CHINSYAN

Conversación entre madres en un parque infantil de una ciudad cualquiera. «¿Verduras? Sería magnífico, pero Leo solo come fideos», suspira la madre de un pequeño de tres años. «Aún estás de suerte», comenta otra. «Para que Sara coma, todos los platos deben estar inundados de kétchup. Pero cuidado con que no se encuentre un trocito de tomate en el plato...». «Al mío le encanta estrujar todo con las manos, al final se forma una auténtica porquería», explica una más.

Padres y madres se solidarizan ante la frustrante tarea de normalizar las comidas de sus hijos. Su mayor deseo sería inculcar a sus vástagos una alimentación sana, además de unos buenos modales en la mesa. Las armas usuales, a saber, los ruegos y los enfados, pierden fuelle en ese terreno. Lina, de cinco años, se sienta con ademán de tozudez ante el plato, rehúsa hincarle el diente a las espinacas. Se queja: «¡Tiene hierbas!». Max, de tres años y medio, tan solo come lacitos de pasta si es con las manos, si no, ni los prueba. Benno, por su parte, responde con una sublime pataleta si se le advierte de que deje de hurgar en el pan y convertir la miga en pequeñas bolitas.

¿Por qué muchos niños se comportan mal durante las comidas? ¿Pueden los padres aspirar a modificar su conducta?

La historia de la evolución humana aporta una explicación razonable a la variedad de preferencias alimentarias que se presentan durante la infancia. A lo largo del tiempo, *Homo sapiens* colonizó prácticamente todas las zonas climáticas de la Tierra, desde los exuberantes trópicos hasta el árido Ártico, con el fin de hallar nuevas fuentes de alimentación. Una misión peligrosa, si se tiene en cuenta que el material que se iba encontrando a su paso no solo contenía nutrientes; también podía incluir componentes indigestos e incluso mortíferos, caso del fruto de la belladona.

Para decidir con qué alimentarse, un humano debía proceder de manera crítica. Algunas preferencias congénitas favorecieron las oportunidades de éxito. El sentido del gusto ayudó a nuestros antepasados a realizar una primera criba de los potenciales alimentos que se encontraban por el camino: dulce, albuminoso y graso presagiaba una alimentación sana y con mucha energía; amargo y ácido, por el contrario, anunciaba la necesidad de obrar con cautela, pues el alimento podría estar verde, podrido o ser venenoso.

Tales predisposiciones genéticas aseguraban la supervivencia de los humanos hace cientos de miles de años. Aún hoy continúan influyendo nuestro comportamiento. No sorprende, pues, que en la actualidad los niños, con sus órganos todavía en desarrollo, reaccionen a la defensiva ante determinados alimentos. Aunque las variedades vegetales actuales sepan menos amargas que sus precursores silvestres, contienen trazas de sustancias amargas que las sensibles lenguas de los más pequeños son capaces de detectar.

Numerosos adultos «víctimas» de la generación de las espinacas recuerdan que de niños podían permanecer sentados ante la verdosa comida durante horas hasta que, aprovechando un momento de descuido, la hacían desaparecer en el florero. Otros aceptaban con resignación los peores castigos con tal de no comerse las espinacas. Con frecuencia, los progenitores consideraban tales reacciones como actos de desobediencia. Sin embargo, desde el punto de vista de la psicología evolutiva se trata de una predisposición comportamental de aversión, un rechazo inconsciente asociado a determinados estímulos.

Dicho enfoque evolucionista explica asimismo el porqué de la preferencia infantil por la crema de cacao para untar y las patatas fritas, y no por las zanahorias y las manzanas. A saber, las «bombas» calóricas ayudaban a los humanos de antaño a sobrellevar las fases de hambruna hasta la

EN SÍNTESIS

## Evolución a la carta

1 La preferencia por el dulce y el rechazo a lo amargo aparece ya desde el nacimiento. Tal conducta proviene de antiguo: protegía a nuestros antepasados de alimentos indigestos o venenosos.

2 El niño reacciona con escepticismo ante alimentos desconocidos para él. Esa conducta, neofobia, se manifiesta con mayor fuerza durante la etapa preescolar.

3 A medida que crecen, los niños se guían por el comportamiento de los demás. Los procesos de aprendizaje social ayudan a superar la neofobia y a adaptarse a la cultura alimentaria del entorno.

## Cinco reglas heredadas de la evolución

1 Consumir alimentos que garanticen la supervivencia, es decir, alimentos dulces y ricos en energía.
2 Comer aquellos que se conocen y protegerse de aquellos que resultan amargos, puesto que podrían contener sustancias tóxicas.
3 Probar solo una pequeña porción si se desconoce el alimento.
4 Comer aquello que los progenitores, hermanos y amigos también saborean.
5 Evitar al máximo los alimentos que hayan dañado alguna vez el estómago.

siguiente comida disponible. Engullir rápido tales aportes calóricos también tenía su sentido: había que aprovechar los momentos en los que reinaba la tranquilidad, pues nunca se sabía cuánto iban a durar. Esa conducta de subsistencia persiste en las sociedades industriales de hoy en día, a pesar de la oferta excesiva de alimentos. Las personas muestran una predilección por la alimentación rica en calorías y la comida rápida cuando el apetito arrecia.

### Temor ante lo nuevo

¿Por qué la mayoría de los niños reaccionan de forma escéptica cuando mamá les sorprende con un comida nueva? ¿Por qué algunos prefieren comer siempre lo mismo? «Cuando Mario era un bebé, lo probaba todo: pesto, queso de cabra, trocitos de oliva, gambas...», nos explica su padre. Hoy por hoy, su hijo va al parvulario. De lunes a domingo exige con ímpetu a la hora de cenar: «Quiero palitos de pescado con puré de patatas».

**Hoy en día, la neofobia y la aversión a las sustancias amargas resultan conductas superfluas**

En el pasado, la neofobia (temor ante lo nuevo) ayudaba a los más jóvenes a evitar accidentes por envenenamiento en su hábitat natural. Mientras las madres los amamantaban y permanecían a su lado, los pequeños no precisaban ser tan selectivos. Al fin y al cabo, adultos inteligentes y de confianza velaban para que aquello que llegaba a su boca estuviera en condiciones. Una actitud hostil y defensiva hubiera resultado contraproducente en esa etapa de desarrollo.

Una vez la cría comenzaba a explorar el entorno por sus propios medios, la situación cambiaba. La madre ya no podía controlar todas las bayas y los tubérculos que caían en las curiosas manos de sus vástagos, de tal manera que la limitación la ponía la genética para asegurar la supervivencia: los niños rechazaban con obstinación aquello que desconocían, en especial si estaba demasiado verde o tenía un sabor amargo.

La neofobia se presenta en otros omnívoros, entre ellos, las ratas y los monos capuchinos. Dichos animales padecen el mismo dilema que *Homo sapiens*: no limitarse a un solo alimento, pero evitar aquellos venenosos. En especial cuando se es joven e inexperto. Con el tiempo, las crías tanto de la especie humana como del resto de los animales aprenden de los congéneres adultos a distinguir una buena alimentación de una mala, al tiempo que sus órganos maduran y se fortalecen frente a las sustancias tóxicas. Por ello, en una edad más avanzada, los jóvenes pueden abrirse a horizontes nuevos del sabor.

Las características genéticas en el terreno de la alimentación han permanecido hasta nuestros días. Aunque nuestros hijos ya no tienen la necesidad de adquirir la comida directamente de la naturaleza y los alimentos que llenan la nevera no son venenosos, el cuerpo infantil continúa guiándose por el programa de supervivencia desarrollado hace miles de años. De esta manera, la neofobia sigue un patrón similar en todos los niños. Entre los cuatro y los seis meses apenas existe tal aprensión a lo nuevo, es decir, la mayoría

## Cinco reglas para los padres

1 No insistir, refunfuñar ni, bajo ningún concepto, amenazar al niño; presionarle demasiado resulta contraproducente.
2 Para introducir un nuevo alimento en la dieta del pequeño se le debe ofrecer el producto repetidas veces a lo largo de unos días, motivándole a probar al menos un trocito.
3 Huir del lema: «Quiero ver el plato vacío»; es una regla carente de sentido e insana.
4 Evitar bebidas y alimentos ricos en calorías una hora antes de la comida: con apetito se suele estar más predispuesto a probar alimentos nuevos.
5 Comer junto con otros niños es la mejor estrategia para ampliar el menú del pequeño.

de los críos de esas edades prueba casi todo lo que se les ofrece. Alrededor del decimoctavo mes se estrecha poco a poco el cerco de la elección.

En edades infantiles más tardías, el escepticismo hacia lo nuevo alcanza su cota máxima. Los niños son ahora realmente malos comedores y rechazan con frecuencia alimentos nuevos, de sabores complejos o quizás amargos. A partir de los ocho a doce años aparece un nuevo cambio. Según concluyeron en 1998 Leann Birch y Jennifer Fisher, de la Universidad estatal de Pensilvania, los niños comienzan a experimentar con alimentos impensables hasta entonces: setas, quesos fuertes y verduras.

## ¿Por qué no quiere sopa?

A partir de las consideraciones biológicas y evolutivas, debería postularse que los niños, a pesar de un menú tan limitado, se desarrollan de forma sana siempre que coman lo suficiente. Betty Carruth y Jean Skinner, de la Universidad de Tennessee, observaron en el año 2000 que los pequeños selectivos en extremo crecían con la misma rapidez que los demás.

La pregunta que se plantea ahora es: ¿deberíamos aceptar las preferencias alimentarias de niños como Leo y Lina? Por desgracia, los programas de protección evolutivos están adaptados a un entorno que ya no existe como tal. La neofobia y la aversión a las sustancias amargas se han vuelto innecesarias, incluso una carga. Los biólogos evolutivos denominan tales predisposiciones ya obsoletas *conductas desadaptativas*.

Las siempre hambrientas células grasas, que antaño ayudaban a los humanos a sobrevivir cuando no había fortuna con la caza, se han convertido en una suerte de desajuste en nuestras sociedades; el sobrepeso infantil es un problema que se extiende. La debilidad que los niños sienten por los dulces también supone un desajuste entre nuestro pasado y nuestro presente. En su día, tal predisposición conductual debió de ejercer de programa de atracción hacia los frutos maduros y ricos en calorías en pro de la supervivencia. Mas, en la actualidad, esa atracción ha cambiado de diana: de los arándanos maduros se ha pasado al chocolate y las chucherías harto azucaradas. Los padres no deberían confiar, en este caso, en la sabiduría de la naturaleza.

¿Cómo se puede estimular a los más pequeños para que prueben alimentos saludables? Está claro que el crío no se deja convencer por unos padres quejicas y preocupados. Las psicólogas Claire Farrow y Jacqueline Blisset, de la Universidad de Loughborough y de la de Birmingham, respectivamente, comprobaron en 2008 que los bebés que habían sido presionados por sus padres para que comieran pesaban a la edad de dos años menos que aquellos que no habían tenido a los progenitores refunfuñando.

La paciencia resulta más eficaz que el enfado. Para lograr que los más pequeños coman los guisantes, una buena solución consiste en ofrecérselos entre ocho y diez veces al día en días consecutivos. Según mostraron en 1994 las profesoras de ciencias de la nutrición Susan Sullivan y Leann Birch, por entonces en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, basta con que el niño pruebe al menos una pequeña porción de la comida que le produce rechazo para que cambie de actitud. De hecho, los niños no comen determinados alimentos solo porque les gustan, también les gustan porque siempre los comen.

## Jugar ayuda a alimentarse

Leann Birch observó en 2001 que el juego contribuye a acelerar la aceptación del hábito. Los niños aceptan mejor la comida del plato cuando se les permite cogerla con las manos para llevársela a la boca, chuparla o arrojarla en alguna que otra ocasión. La experiencia táctil y el juego generan

FOTOLIA / MIROSLAVA DROZDOWSKI

**SABROSAS FRUTAS**
El color rojo de la fruta indica que está madura, es dulce y aporta energía, por lo que invita a degustarla.

FOTOLIA / CONTRASTWERKSTATT

**MEJOR EN COMPAÑÍA**
El juego anima a los niños a probar nuevos placeres culinarios. Si la experiencia se comparte con un amigo, se obtiene mejor resultado.

buenas sensaciones en ellos. Esas mismas emociones les inducen a probar otros alimentos a los que están menos acostumbrados.

Asimismo, resulta de utilidad contar con una persona que dé ejemplo al menor para que se abra a nuevas experiencias en su dieta. Según Birch, los niños entre uno y cuatro años manifiestan dos veces más probabilidades de catar un alimento para ellos nuevo si ven cómo un adulto degusta antes que ellos una ración del mismo, los trata con amabilidad y les indica que prueben el manjar. Ese contagio aumenta cuando son otros chavales de la misma edad los que dan ejemplo, tal y como comprobaron en 2005 Birch y sus colaboradores. Con frecuencia los hijos únicos se muestran más dispuestos a ampliar las opciones de su menú cuando van al parvulario.

Todos los niños, sean de donde sean, deben aprender en algún momento de su vida a sacar partido de las diversas fuentes de alimentación disponibles en el lugar en el que habitan; ya sea la sabrosa grasa de foca en el Ártico, ya las frutas tropicales en la cuenca del Amazonas. El programa evolutivo de supervivencia contribuye a superar la neofobia y desarrolla en ese momento la capacidad del aprendizaje social. Los niños observan la actuación de los demás y adoptan su conducta.

Los investigadores del comportamiento conocen dicho fenómeno del reino animal. Elisabetta Visalberghi y Elsa Addessi, del Instituto de Ciencias Cognitivas y Tecnológicas de Roma, observaron en 2000 que los monos capuchinos aumentaban su tendencia a catar alimentos novedosos cuantos más congéneres se hallaban presentes. Si estos últimos probaban un bocado, entonces el efecto se incrementaba aún más. No obstante, al contrario de lo que sucede en los jóvenes humanos, a las crías de capuchino les traía sin cuidado si sus semejantes de la jaula contigua comían alimentos extraños o comida habitual.

También los macacos sudafricanos que conviven en agrupaciones sociales aprenden unos de otros. Aunque no siguen el ejemplo de manera arbitraria. Erika van de Waal, de la Universidad de Neuchâtel, observó en 2010 que los animales jóvenes adoptaban determinadas maneras de comportamiento solo de las hembras más mayores, pero no de los machos de más edad. Cuando colocaba en el recinto de monos una caja llena de golosinas y protegida con un cerrojo, el ejemplar de mayor rango no tardaba en subirse a ella. Por lo general, el jefe (podía tratarse de un macho o de una hembra) aprendía con rapidez a manipular el cerrojo. Mientras, los jóvenes no perdían detalle de cuanto acontecía. En un ensayo posterior se permitió a los macacos «espectadores» que se acercasen a la caja. Tan solo los jóvenes del grupo al mando de una hembra interiorizaban el truco, por lo que conseguían abrir la caja, mientras que aquellos con jefes macho, no.

¿Por qué solo el modelo femenino servía de ejemplo? El estilo de vida de los macacos arroja luz sobre la cuestión. Mientras que las hembras permanecen toda su vida en el mismo territorio, los machos deben buscarse un nuevo grupo

## Educación del gusto

**Junto al aprendizaje social,** las experiencias olfativas y gustativas antes del nacimiento son significativas de cara a las posteriores preferencias alimentarias. Ágnes Bilkó, de la Universidad Eötvös Loránd, demostró hace ya más de quince años que las crías de las conejas que fueron alimentadas con enebrinas (bayas maduras) cuando estaban preñadas preferían después dichos frutos.

En los humanos también desempeña un papel importante el fomento en el seno materno y durante el amamantamiento, tal y como mostró Julie Menella del Monell Chemical Senses Center en Filadelfia en 2002. Un grupo de madres bebía zumo de zanahorias con regularidad hacia el final del embarazo y durante la primera etapa de lactancia. Los componentes del sabor traspasan al líquido amniótico y a la leche materna. Más tarde, los bebés preferían la papilla cuyos cereales contenían esa variedad de sabor. Los investigadores observaron un fenómeno similar con aromas como el anís, el ajo o la vainilla.

(«Prenatal and postnatal flavor learning by human infants». J. A. Mennella et al. en *Pediatrics*, vol. 107, pág. E88, 2001.)

tras la pubertad. Es por ello por lo que siempre son considerados como «foráneos» con pocos conocimientos sobre los desafíos que presenta el territorio. Aprender de las hembras debió de suponer para la prole una estrategia adaptativa de supervivencia.

### Diversidad de modelos

De la misma manera, los niños humanos no siguen de forma automática el ejemplo paterno, a pesar de que las guías de consejos para padres pretendan enfatizarlo con frecuencia. Según el problema y la edad, los retoños buscan su propio modelo. A veces lo hallan en los hermanos, otras en los personajes famosos que ven en los medios de comunicación y otras en los amigos de su misma edad. De hecho, nadie es un experto en todo, por lo que debe buscarse un patrón concreto para cada aprendizaje. El largo período vital que comprende la infancia humana permite adoptar diversos modelos, de manera que se aprende a manejar las complejas demandas que exige la sociedad.

Recopilemos: ¿por qué los niños rechazan, tiran y manosean la comida? Los niños experimentan en lo que a la alimentación se refiere una especie de revolución. Pasan de un entorno alimentario seguro y vigilado de cerca por su madre a un mundo lleno de peligros. Con el fin de sobrevivir en los más diversos biotopos, la evolución nos ha proporcionado determinadas reglas de aprendizaje que se van superando con la edad (*véase el recuadro* «Cinco reglas heredadas de la evolución»). Esas reglas promueven una adaptación lo más adecuada posible a las circunstancias del lugar.

El aprendizaje basado en la genética y el que se deriva de la experiencia se influyen mutuamente. El ser humano es impulsado por mecanismos desde su nacimiento, los cuales surten efecto hasta un momento determinado del desarrollo. Por una parte, la tendencia a ingerir o no determinados alimentos por sus cualidades de sabor (dulce, ácido o amargo), así como la neofobia pertenecen al proceso de maduración en el desarrollo infantil. Tales programas han sido fijados en los factores hereditarios del ser humano; también se encuentran, de manera similar, en otros mamíferos omnívoros.

Por otro lado, conforme crecen, los niños superan la neofobia gracias a una mayor tendencia a orientarse según el comportamiento de las personas de su entorno y a aprender de ellas. De esa manera, se introducen en costumbres dietéticas acordes con las características culturales y familiares propias. A Max le gusta el filete de cerdo; Can prefiere pata de cordero; Mariella se hará vegetariana y Jenny prefiere la comida rápida. Con todo, si quiere influir sobre las preferencias alimentarias de sus hijos no olvide que, por naturaleza, comer consiste en un placer sensorial. Para que continúe siendo así, aborde el tema con diversión y tolerancia.

***Herbert Renz-Polster*** *es pediatra e investiga en el Instituto para la Salud Pública de Mannheim, en la Universidad de Heidelberg.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 55

### Para saber más

**Seeing group members eating a familiar food enhances the acceptance of novel foods in capuchin monkeys.** E. Visalberghi y E. Addessi en *Animal Behaviour*, vol. 60, págs. 69-76, 2000.

**Family environmental factors influencing the developing behavioral controls of food intake and childhood overweight.** L. L. Birch y K. K. Davison en *Pediatric Clinics of North America*, vol. 48, págs. 893-907, 2001.

**Specific social influences on the acceptance of novel foods in 2-5-year-old children.** E. Addessi et al. en *Appetite*, vol. 45, págs. 264-271, 2005.

**Controlling feeding practices: Cause or consequence of early child weight?** C. V. Farrow y J. Blissett en *Pediatrics*, vol. 121, págs. e164-e169, 2008.

**Kinder verstehen. Born to be wild: wie die evolution unsere kinder prägt.** H. Renz-Polster. Kösel, Múnich, 2009.

**Selective attention to philopatric models causes directed social learning in wild vervet monkeys.** E. van de Waal et al. en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 277, págs. 2105-2111, 2010.

# Sentido del tacto

La investigación de la percepción táctil se encuentra todavía en mantillas, aunque promete resultados de interés médico, por ejemplo, en lo referente a la anorexia nerviosa

MARTIN GRUNWALD

EN SÍNTESIS

### Por fuera y por dentro

1 El sentido del tacto alberga todavía numerosos misterios. A grandes rasgos, se puede distinguir entre una recepción pasiva de información y otra activa.

2 El cerebro evalúa con precisión las informaciones motoras y sensoriales interrelacionadas, ya sea cuando escribimos, conducimos o subimos unas escaleras.

3 Sin embargo, el esquema corporal aparece desfigurado en numerosas patologías mentales, entre ellas, la anorexia nerviosa. Al parecer, en estos casos también existe un déficit de la percepción táctil.

A primera hora de la mañana, el zumbido monótono del despertador entra, inmisericorde, en nuestra consciencia. Con los ojos aún cerrados, la mano palpa buscando la mesilla de noche. Los dedos se deslizan por encima del libro y las gafas dejadas sobre el mismo; rozan ligeramente el vaso de agua. Al fin, dan con el perturbador y, tras un breve tanteo, se le reduce al silencio con una presión atinada en el botón de paro. Aliviados, nos volvemos a dormir y no pensamos, ni en sueños, en lo que acabamos de hacer.

Apenas si reparamos en el sentido del tacto, que es esencial en toda acción y aprendizaje. ¿Quizá porque no es concebible una vida sin él? Una pérdida total de este sistema sensorial no proviene de la naturaleza; sin él nos resultaría harto improbable la supervivencia.

Queda mucho por conocer sobre las prestaciones del sentido del tacto, extraordinariamente complejas. En principio, se puede distinguir entre una recepción pasiva de información y otra activa. Se habla de una sensación táctil cuando los estímulos térmicos, de presión o dolor afectan a una zona del cuerpo inmóvil. Cuán importante sea esta estimulación pasiva ya en la primera infancia nos lo revelan las investigaciones en animales: en cuanto se separaban los ratoncillos de sus madres, disminuía de inmediato la producción de hormonas del crecimiento, a no ser que el experimentador sustituyera el déficit de caricias maternales rozándolos con un pincel. Pero si falta del todo la estimulación táctil en un determinado intervalo temporal, no se desarrolla con normalidad ni el cuerpo ni el cerebro del múrido.

## Medicina amable

Hace años que estos conocimientos inspiraron a los médicos en Estados Unidos y Suecia ciertas terapias con los neonatos. Con suaves masajes por todo el cuerpo lograban que los recién nacidos segregaran menos hormonas de estrés, durmieran más tranquilos y aumentaran de peso. Se daba, además, por supuesto que los contactos precoces repercutían en la inteligencia posterior y, también, en las capacidades emocionales y sociales.

Al parecer, las sensaciones y las tiernas caricias están conectadas directamente unas con otras en nuestro cerebro. Los ligeros contactos con la piel estimulan las terminaciones nerviosas de las fibras C, que, según las más recientes investigaciones, se han formado antes del nacimiento. Los impulsos de estas fibras llegan, sin estaciones intermedias, al sistema límbico, un conjunto de regiones cerebrales que administran el mundo de las emociones.

En cambio, el tacto activo, la percepción táctil del entorno con las manos, pies o boca, nos posibilita elaborar una representación interna de los objetos. Son muchas las propiedades materiales y espaciales que no pueden captarse con solo los ojos; por ejemplo, el peso de los objetos, su dureza, elasticidad o aspereza. En cuanto los infantes empiezan a asir, se meten en la boca cuanto cae en sus manos, para «sacarle» todas las informaciones táctiles. Frenar este espíritu explorador resultaría contraproducente. Cuando un crío de dos años chapotea incansable en el agua, quizá no pretende otra cosa que, por medio de una constante acumulación de informaciones, reducir una contradicción palpable de sus experiencias sensoriales. ¿Qué puede ser esto? Lo puede ver como cualquier

THINKSTOCK

**JUEGOS CON AGUA**
Desde pequeños captamos el entorno no solo con los ojos y los oídos, sino sobre todo a través del tacto.

otra cosa; percibir la resistencia a la mano plana, lo mismo que el frío o el calor. Pero tan pronto trata de aprehender el líquido, en la mano solo quedan unas cuantas gotas.

Ahora bien, ¿cómo surgen estas tiernas impresiones? Una red de sensores táctiles recorre todo nuestro cuerpo. Hasta ahora, los investigadores solo han evaluado su número con poca exactitud. En conjunto serían entre seis y diez millones de sensores. Todavía no se conoce con profundidad suficiente dónde se hallan estos recolectores de información. Obviamente en la piel; abundan en las zonas erógenas y en el área bucal. Pero hemos de incluir dentro del sentido del tacto aquellos sensores que suministran información al cerebro sobre la posición y movimientos de las extremidades. Sin estos receptores sensoriales especializados, de articulaciones, tendones y husos musculares, nos hallaríamos indefensos y desorientados: no podríamos andar, ni mantenernos en pie ni coordinar las manos para asir algo.

En su conjunto, los receptores abarcan una amplia gama de construcciones diversas, que van desde las sencillas terminaciones nerviosas libres hasta los complicados sensores. A menudo, no podemos diferenciar entre sí sus funciones; muchas veces, son poco conocidas. Mencionaremos aquí solo algunos ejemplos fascinantes. Los receptores mayores, que pueden llegar a medir cuatro milímetros de largo, son los corpúsculos de Pacini. Residen en la hipodermis, músculos y tendones; se han especializado en estímulos vibratorios de entre 40 y 1000 hercios. Registran no solo la vibración del teléfono móvil que llevamos en el bolsillo, sino también, cuando vamos al volante, la vibración familiar de nuestro coche, que nos comunica si el motor y los neumáticos operan con normalidad. Es posible que nuestros antepasados dependieran, entre otras, de la «función de aviso» de los sensores de vibración, incluidos los propios corpúsculos de Pacini. Antaño eran quizá muy sensibles a las vibraciones del suelo que anunciaban la aproximación de los enemigos. Corresponde a los corpúsculos de Meissner ocuparse de oscilaciones más lentas, entre 0,3 y 3 hercios.

## Trato de favor a la presión

Los diminutos receptores (unas 40 milésimas de milímetro de ancho y algo más del doble de largo) se alojan en la zona subcutánea. Un gran número

THINKSTOCK

**MODA ASESINA DEL TACTO** Con estos zapatos, la planta del pie es incapaz de sentir el firme de la calzada. Si con ellos podemos caminar es gracias a los sensores de músculos y articulaciones.

de ellos forman una extensa red de recepción en la piel, especialmente densa allí donde deben procesarse de una manera diferenciada los estímulos táctiles. Los adultos, por ejemplo, tienen en los dedos 24 elementos por milímetro cuadrado.

La exuberante riqueza de las manos en sensores táctiles diversos nos permite realizar muchas destrezas con los dedos, incluso a ciegas o con los ojos vendados. Escribir con el bolígrafo requiere, por ejemplo, un conocimiento permanente y detallado de en qué forma el adminículo toca la superficie de los dedos que lo aprietan, así como de los cambios de presión que provoca en la superficie de contacto de la epidermis el proceso de escribir. Nos sería también imposible andar erectos y permanecer en pie, si los corpúsculos de Meissner y otros receptores táctiles no hicieran llegar ininterrumpidamente datos sobre la deformación de las plantas de los pies, a partir de los cuales el cerebro calcula después los parámetros necesarios para mantener la posición vertical. Bajo condiciones difíciles, como cuando llevamos zapatos de suelas muy gruesas, se ven implicados otros sensores de músculos y articulaciones. Así, los corpúsculos de Ruffini; se hallan no solo en la piel, sino también en el tejido conjuntivo, que controla las cápsulas articulares de las extremidades: colaboran suministrando al cerebro una información precisa de la posición de brazos y piernas.

Fundamento de esta valoración impresionante de la posición es la refinada estructura de los corpúsculos de Ruffini. Se componen de tres cilindros, que forman en el centro una especie de nudo. Por el interior de los cilindros corren, en el tejido conjuntivo, en músculos y tendones, unos haces de fibras fijas, que se estiran o contraen en cada movimiento de la articulación. Las señales que envían al cerebro las interpreta luego este como un cambio de la posición de la articulación. Con algo de concentración podemos, pues, no solo andar con zapatos de suela muy alta, sino utilizar también con relativa seguridad el pedal del gas del coche.

## Trabajo de precisión

Con cuánta precisión percibe nuestro cerebro la posición de las extremidades lo pone de manifiesto el experimento siguiente: un voluntario, con los ojos vendados, ha de palpar la posición de dos palancas en ángulo de una máquina, y luego ajustar, con la máxima exactitud posible, el ángulo de una palanca con el de la otra. Se averigua así la precisión con la que un probando capta la orientación de sus extremidades cuando toca las manecillas en ángulo. La mayoría de las veces sale tan bien, que, al final, el ángulo dado y el «copiado» divergen solo entre 0 y 3 grados.

Para ilustrar la compleja tarea táctil se suele indicar la subida de unas escaleras. En este caso, el cerebro ha de procesar sin cesar la posición del propio cuerpo en una reproducción palpada, que se genera internamente al mismo tiempo, del mundo exterior. Como elementos auxiliares para la necesaria interpretación del entorno actúan, entre otros, los husos tendinosos de Golgi —receptores de los tendones muy sensibles al estiramiento— y los husos musculares, que, como flexo fibroso delicado, se extiende por el músculo. Informan al cerebro de cualquier alteración de la longitud y tensión del correspondiente músculo del esqueleto. Las condiciones de contracción al subir el primer peldaño sirven, después, como ajuste previo para los siguientes. El cerebro compara constantemente, uno con otro, el estado «previsto» con el estado «real»; en la inmensa mayoría de los casos, sin errores y sin ser consciente de ello. La clave reside en que los peldaños son aproximadamente iguales en altura y profundidad. De repente, los valores previstos por el sentido del tacto del desarrollo motor automatizado no se adecuan con la realidad; por así decir, el tropiezo está preprogramado.

El cerebro ha de evaluar con precisión las informaciones motoras y sensoriales interrelacionadas, se trate de escribir, conducir un coche o subir las

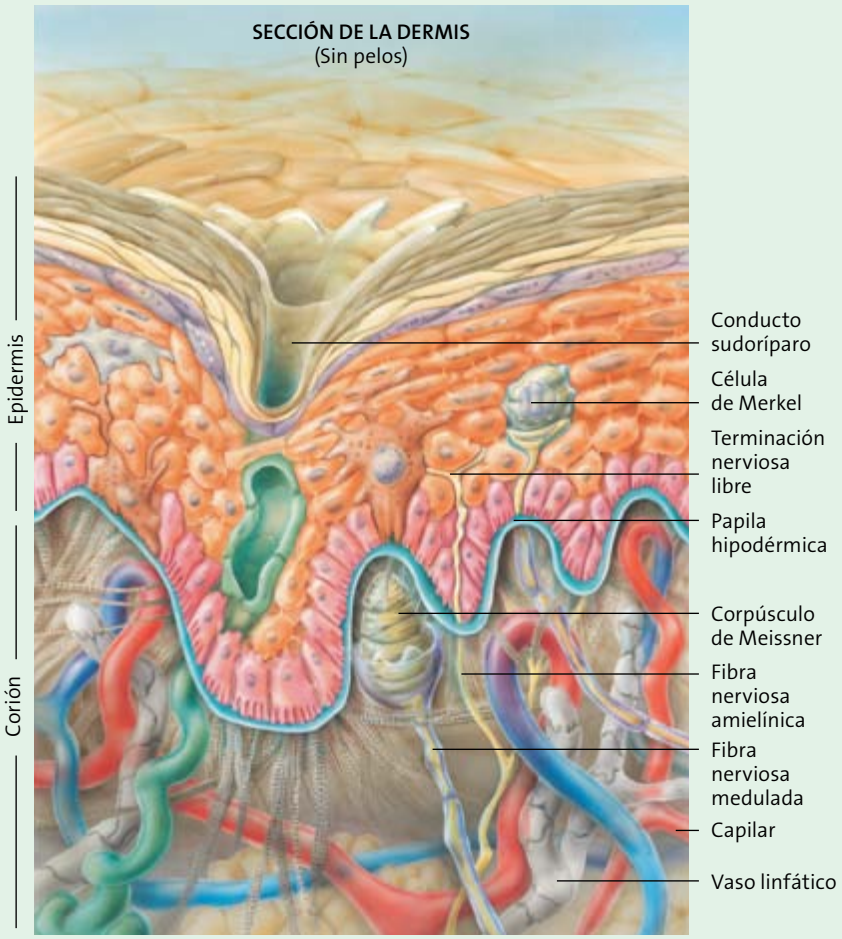
## Investigación de las delicias del tacto

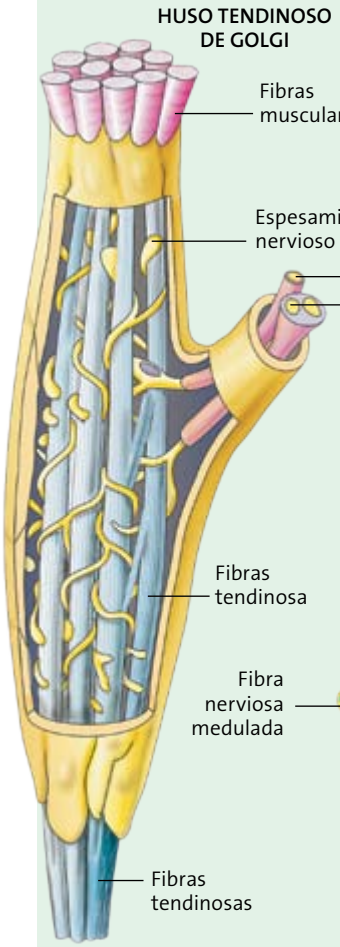
En nuestros días, los fabricantes procuran que sus nuevos productos presenten un «diseño táctil» óptimo, atractivo para la venta. Se examina qué materiales del envase podrían lograr que un licor aumentara su cuota de mercado; o también qué dureza debería tener el asiento de un coche deportivo para adaptarse al estado de ánimo del potencial comprador. Pero en el tema de la consistencia del yogur la cuestión se complica; los alemanes interpretan como signo de calidad que el yogur sea cremoso, en tanto que los franceses consideran que un yogur bueno y sano debe ser ante todo floculoso.

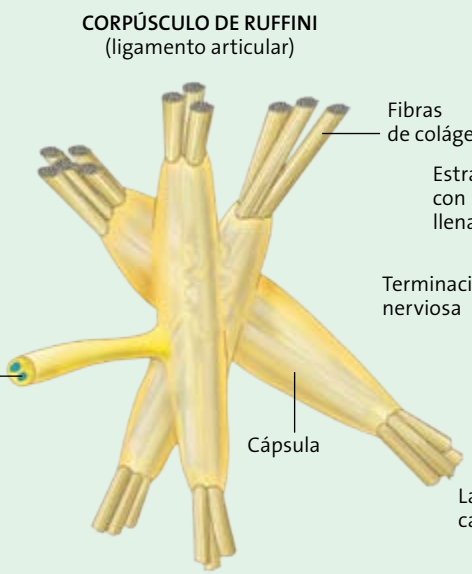
THINKSTOCK

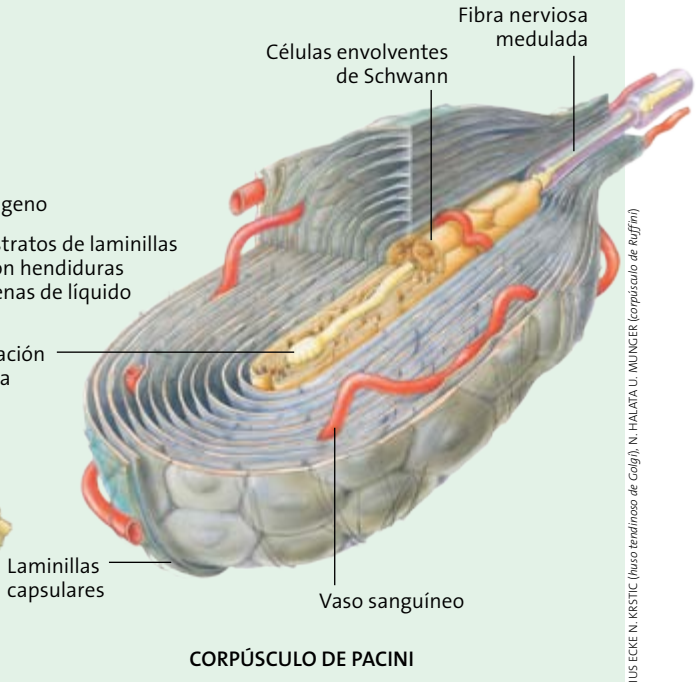
## Sensores para todos los casos

**El principal escenario de los sucesos táctiles se halla en la piel.** Alojadas en la hipodermis, las células de Merkel permiten a los dedos resolver detalles espaciales hasta de solo 0,5 milímetros. Mientras las terminaciones nerviosas libres detectan los estímulos móviles más ligeros, los corpúsculos de Meissner son decisivos en el control al asir los objetos. Los corpúsculos de Ruffini reaccionan con particular sensibilidad a los estímulos de estiramiento en la piel, pero también en las articulaciones. Junto con otros receptores, como los husos tendinosos de Golgi, informan sobre la posición de las extremidades. Los corpúsculos de Pacini, repartidos por muchas zonas del cuerpo (por ejemplo, en la hipodermis, en las articulaciones y en los órganos internos), reaccionan preferentemente a los estímulos vibratorios; las oscilaciones algo más lentas son amortiguadas por las lamelas.

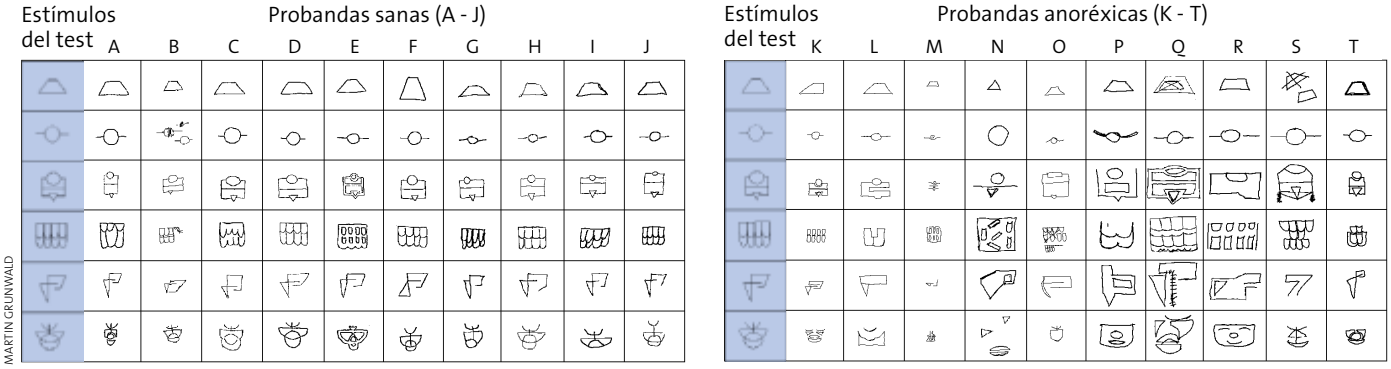


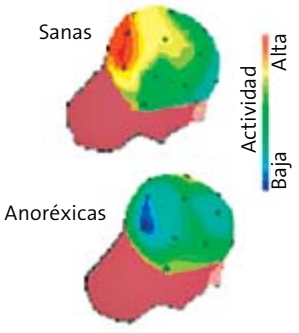




JULIUS ECKE N. KRSTIC (*huso tendinoso de Golgi*), N. HALATA U. MUNGER (*corpúsculo de Ruffini*)




**PERCEPCIÓN DESFIGURADA**

En comparación con las mujeres sanas, las enfermas de anorexia hallan mayores dificultades en reproducir en papel los relieves (*arriba*) palpados a ciegas. Además, la corteza parietal derecha de su cerebro se encuentra menos activa al palpar los relieves (*abajo*).




escaleras. Incluso ejercicios de sencillez aparente, como palpar un dado con los ojos vendados, exige el trabajo no solo de una región del cerebro, sino la intervención de casi todas. Aunque todo induce a suponer que cumple al lóbulo parietal responsabilidad mayor. Con la corteza parietal dañada, los afectados no son capaces ya de alcanzar, a ciegas, un despertador estridente que está sobre la mesilla de noche y reducirlo a silencio. Padecen astereognosia (o amnesia táctil), una merma de la percepción táctil, que les imposibilita palpar a ciegas los objetos de la vida cotidiana.

Cómo experimentamos nuestro cuerpo en sus dimensiones y su posición en el espacio, lo determina, no en último término, el tacto. Tocamos con nuestras manos zonas que no podemos ver, como la cabeza o la nuca, y notamos esa presión de inmediato. Por eso, los humanos podemos, por lo general, evaluar muy bien su extensión, anchura y peso. A esta representación de las dimensiones exteriores del cuerpo (la reproducción interna y personal, que va cambiando a lo largo de la vida) se la denomina representación corporal interna o esquema corporal.

## Una imagen insustituible del yo

Para lograrla, la corteza parietal combina los millones de informaciones individuales aferentes de los sensores táctiles de músculos, articulaciones, tendones y de la epidermis, que forman, en el menor tiempo posible, una imagen interior de nosotros mismos. En este caso, parece que el sentido de la vista es secundario, pues incluso los ciegos de nacimiento no tienen ningún problema en desarrollar una imagen interna del cuerpo.

Pero el esquema corporal está tan desfigurado en muchas patologías, que los enfermos hacen un cálculo muy impreciso de las dimensiones de su cuerpo. Lo observamos en casi todos los casos de anorexia mental (anorexia nerviosa), una grave enfermedad psíquica, que lleva a la muerte a entre un 10 y un 20 por ciento de los casos. Las afectadas sienten y describen su cuerpo como obeso e hinchado, pese a su manifiesta y extrema delgadez. No suele apartarles de este convencimiento ni una confrontación con la imagen que refleja el espejo, ni los datos objetivos de la balanza.

Nuestro equipo sospechaba la presencia de un desajuste de la función de integración de la corteza parietal en los trastornos del esquema corporal de las anorexias mentales. De ser así, las pacientes deberían tener también problemas en la solución

**CONEXIONES PARALELAS**

El sentido del tacto nos posibilita que, con los ojos vendados, el ángulo captado en una palanca de un aparato se transporte a una segunda palanca con una imprecisión de pocos grados.

MARTIN GRUNWALD

de ejercicios de percepción táctil. Al mismo tiempo, se habían de observar cambios característicos de la actividad eléctrica en las áreas cerebrales parietales.

## Primero sentir, después dibujar

Para comprobarlo, pusimos en las manos de mujeres sanas y anoréxicas modelos en relieve, que ellas debían tocar, con los ojos vendados. A continuación, quitada la venda, y en ausencia de los objetos, tenían que dibujarlos con la mayor exactitud posible en una hoja de papel; mientras procedían a ello, grabábamos la actividad eléctrica cerebral.

A las pacientes anoréxicas les resultó difícil realizar estos ejercicios de percepción. Sus reproducciones gráficas fueron, a diferencia de las hechas por las probandas sanas, parcialmente erróneas. Una repetición del test, dos años más tarde, con las mismas pacientes no cambió el resultado. Los análisis de la actividad eléctrica cerebral revelaron, además, que en las pacientes anoréxicas la corteza parietal derecha trabaja bastante menos que en las probandas sanas.

Presumiblemente, en las anoréxicas están alteradas importantes funciones cerebrales de integración que podrían ser corresponsables de los déficits de percepción táctil observados y, también, del distorsionado esquema corporal. Con estos conocimientos nos proponemos desarrollar en el futuro medidas terapéuticas para reorganizar los procesos disfuncionales.

El sentido del tacto sigue siendo un campo de investigación fascinante y apenas estudiado. Cuán incompleto sea nuestro conocimiento lo muestran los intentos por simularlos en ingenios técnicos: la sensación táctil de objetos asibles, simulada por medio de «ciberguantes», en los que todo tipo de minimotores estimulan los dedos, difiere considerablemente de la sensación natural. Con todo, contamos con algunas aplicaciones útiles: los neurocirujanos, por ejemplo, pueden practicar, mediante interfaces táctiles, operaciones complicadas y peligrosas del cerebro en operaciones simuladas.

¿Qué futuro nos espera? Algunos científicos proyectan escenarios que recuerdan la trama de la película *Matrix*; para originar sensaciones táctiles, el rodeo a través del propio aparato sensorial ha quedado obsoleto, afirma un miembro del equipo del Laboratorio Táctil del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Se producirían mejor las sensaciones deseadas interviniendo en el lugar adecuado, es decir, en el cerebro.

WIKIMEDIA COMMONS / VANILLASE / CC BY-SA 3.0

**¿COPIA DE LOS HUMANOS?** Asimo, el robot humanoide, puede caminar con relativa seguridad e incluso subir escaleras.

La robótica va por otros senderos. Los investigadores tratan de imitar al fabuloso ser humano en forma de máquinas humanoides o incluso de mejorarlo. Se puede evaluar en robots, como Asimo, lo que han logrado estos ensayos: un aparato más bien macizo que, con ayuda de una mecánica y un conjunto sensorial afinados, amén de una adecuada programación computacional, consigue andar sobre dos piernas e incluso subir escaleras.

Sin embargo, la red de receptores del sentido del tacto desarrollado en *Homo sapiens* no se puede reproducir, por ahora, en las creaciones de la técnica. A los robots les falta la extensa variedad de impresiones táctiles, sin las cuales se les escapa una experiencia fundamental, a saber, aquella a la que designamos como aprehensión de nuestro entorno. Si se quiere conferir a las máquinas la capacidad de sentir y reaccionar, lo más semejante posible a como lo hacen los humanos, habría que empezar por dotarlos de un tacto activo.

***Martin Grunwald*** *estudia, en el laboratorio de investigación del EEG y del sentido del tacto de la clínica psiquiátrica de la Universidad de Leipzig, la percepción táctil y sus aplicaciones clínicas.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 10

### Para saber más

**Der bewegte Sinn.** Dirigido por M. Grunwald y L. Beyer. Birkhäuser Verlag, Basilea, 2001.

**Feeling Bumps and Holes.** R. Flanagan y S. J. Lederman en *Nature*, vol. 412, págs. 389-391, 2001.

# ¿Diestra o siniestra?

La corteza cerebral derecha transmite las sensaciones a la mitad izquierda del cuerpo, y viceversa. No obstante, tal principio omite parte de la realidad: el cerebro nos «vende» un lado u otro según la situación

MICHAEL SPRINGER

Imagínese el lector que se encuentra relajado en la tumbona, leyendo, con la pierna derecha cruzada sobre la izquierda. De repente percibe algún movimiento extraño en su pie derecho. Guiado por el instinto, dirige la mirada hacia la izquierda, pues es allí donde espera descubrir la causa de la molestia. Objetivo conseguido: el gato del vecino está arañando su zapato derecho. ¿Por qué estaría tan seguro de que el motivo de la interrumpida tranquilidad se hallaría a su izquierda?

Para conocer dónde procesa el cerebro las sensaciones táctiles existe una primera solución archiconocida: el homúnculo. Este literalmente traducido «hombrecillo de las sensaciones corporales» consiste en una figura distorsionada de un humano, la cual refleja el espacio sensorial relativo que las partes corporales representan en la corteza cerebral *(véase la figura de la página 66)*.

A mediados de los años cuarenta del siglo pasado, los neurocirujanos Theodore Rasmussen (1910-2002) y Wilder Penfield (1891-1976) estimularon mediante corrientes eléctricas determinadas áreas corticales del cerebro de pacientes con epilepsia, quienes sintieron, acto seguido, un hormigueo en las correspondientes zonas corporales. Los médicos comprobaron con sorpresa que las partes del cuerpo vecinas entre sí se hallaban representadas también en puntos limítrofes de la corteza cerebral, disposición que recibe el nombre de somatotópica.

El homúnculo muestra un aspecto muy deformado. Con razón. Las partes del cuerpo como los labios, la lengua y las puntas de los dedos reaccionan con mayor sensibilidad al tacto a causa de la gran cantidad de receptores táctiles en esas

ISTOCKPHOTO / ELENA ELISSEEVA

**CON SOLO GIRAR LA MANO**
La derecha está allí donde el pulgar se encuentra a la izquierda. Claro que ese principio solo es cierto si miramos el dorso de la mano. Si variamos la perspectiva, debemos ajustar nuestras coordenadas internas.

zonas de la piel, por lo que requieren más nervios, es decir, más espacio en la corteza cerebral. De ahí su tamaño desproporcionado.

## Homúnculo cruzado

Rasmussen y Penfield observaron, asimismo, que los dos hemisferios cerebrales se conectaban con las mitades opuestas del cuerpo: para las sensaciones de un lado concreto del cuerpo era responsable el homúnculo del hemisferio cerebral contrario. Por consiguiente, una lesión en la corteza cerebral somatosensorial derecha producía entumecimiento en la parte izquierda del cuerpo, y viceversa. ¿Tema zanjado?

Brenda Rapp, neuropsicóloga del departamento de ciencia cognitiva de la Universidad Johns Hopkins, descubrió un fenómeno que rompía en cierto modo con las reglas, y aportaba nuevos enigmas: algunos pacientes con lesión cerebral en el hemisferio derecho dejaban de forma repentina de presentar alteraciones en la sensación de los estímulos táctiles de su mano siniestra (la mano afectada) tan pronto como colocaban esta ante la mitad derecha del cuerpo. ¿Cómo era posible?

Por lo visto, la representación cerebral de las manos no confiere un único marco de referencia somatotópico, puesto que en ese caso sería irrelevante la posición espacial de estas en un momento determinado. En el curso del procesamiento ulterior de los estímulos táctiles que se desarrolla en las áreas somatosensoriales superiores deben encontrarse implicados otros sistemas de referencia. Con los pacientes funcionó un sistema «centrado en el tronco», en el que resultó determinante la posición de su mano en relación al centro de la parte superior del cuerpo.

En un encuentro de psicólogos cognitivos europeos que tuvo lugar a comienzos de 2010 en Bressanone, Rapp informó sobre un individuo al que un accidente cerebrovascular en el hemisferio izquierdo le había causado parálisis y alteraciones de la sensibilidad en la zona derecha del cuerpo. Este hombre presentaba un trastorno poco frecuente, la sinquiria (del griego *syn*, «junto»; y *cheir*, «mano»). Cuando le tocaban un punto de su mano izquierda (la no afectada) sentía a menudo una sensación fantasma en la diestra, la cual carecía de sensibilidad y se encontraba paralizada.

Existen numerosos datos que confirman que al tocar la mano izquierda de los probandos sanos se estimulan áreas cerebrales somatosensoriales en ambos hemisferios, con lo que se suprime normalmente la actividad de la parte izquierda. Rapp opina que ese mecanismo podría encontrarse alterado en las personas con sinquiria: cuando las neuronas inhibidoras mueren, tal y como ocurre en sujetos que han sufrido un accidente cerebrovascular, se activan las regiones somatosensoriales de ambos hemisferios. Por ello, algunas veces el paciente manifiesta sensaciones táctiles en ambas manos, aunque solo se haya estimulado una de ellas.

A continuación, Rapp se preguntó qué parte del encéfalo era responsable de la inhibición en

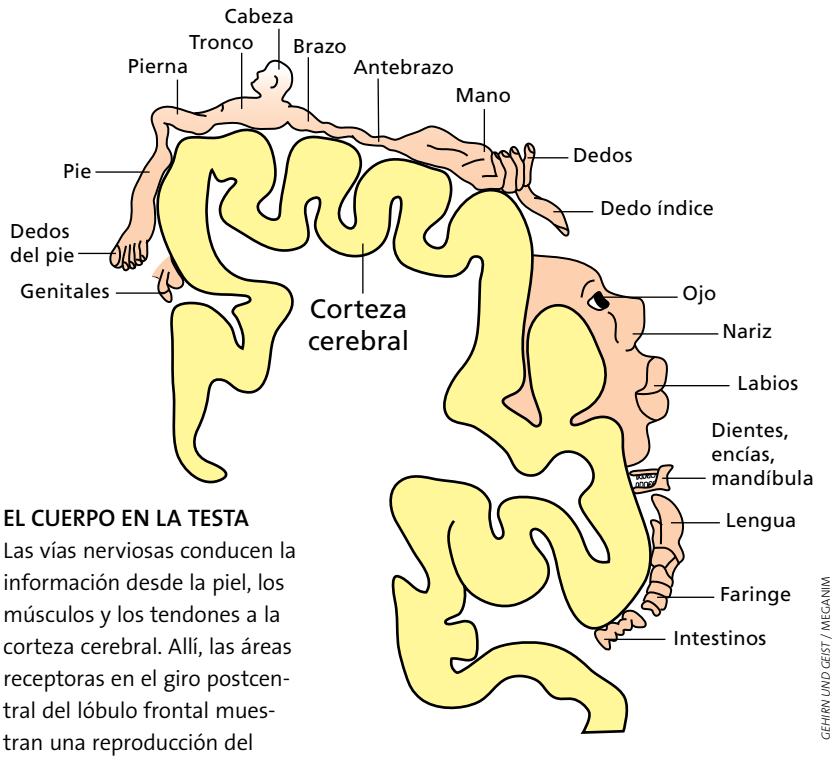
EN SÍNTESIS

### Punto de vista flexible

1 Las sensaciones táctiles de una determinada mitad del cuerpo no solo las controlan áreas del hemisferio cerebral opuesto, tal y como se creyó durante mucho tiempo.

2 Existen marcos de referencia flexibles. Según el lado en que se encuentre la mano, procesará la sensación táctil uno u otro hemisferio cerebral.

3 A veces el foco de nuestra atención determina qué se representa como derecha o izquierda.




GEHIRN UND GEIST / MEGANIM

**EL CUERPO EN LA TESTA**

Las vías nerviosas conducen la información desde la piel, los músculos y los tendones a la corteza cerebral. Allí, las áreas receptoras en el giro postcentral del lóbulo frontal muestran una reproducción del cuerpo: el homúnculo sensorial. Las partes más sensibles, como los dedos, las manos y los labios, se representan en proporciones exageradas, puesto que poseen más receptores táctiles que, por ejemplo, el tronco y las piernas. En el hemisferio cerebral derecho está representada la parte izquierda del cuerpo; en el izquierdo, la derecha.

cada caso y qué sistema de referencia actuaba en esa actividad. En 2008, junto con sus colaboradores, experimentó con distintas posiciones de la mano en relación al centro del cuerpo y al centro de la cabeza para dar con la respuesta. Si la sinquiria dominara siempre en un marco de referencia somatotópico, debería aparecer con independencia del lugar donde el paciente tuviese en ese momento la mano. Sin embargo, la posición de la mano sí que suponía una diferencia: si el probando colocaba ambas manos ante la parte izquierda de su cuerpo (la no afectada), el estado de sinquiria aparecía con menor frecuencia. Al parecer, el hemisferio derecho (no afectado) era el responsable de la inhibición. Aquí actuaba un marco de referencia «centrado en el tronco» para el que resultaba determinante la posición de las manos respecto a la parte superior del cuerpo.

En otro experimento, la mano izquierda permanecía a la siniestra, y la derecha, a la diestra; el sujeto giraba la cabeza hacia un lado hasta que veía ambas manos a la izquierda o a la derecha del campo visual. En ese caso, la sinquiria tampoco permanecía constante: si ambas manos se encontraban en el campo visual izquierdo (sano), el fenómeno se presentaba en muchas menos ocasiones. Existía un marco de referencia diferente condicionado por la posición de la cabeza.

Por último, los investigadores quisieron averiguar qué ocurría cuando el paciente cruzaba los brazos. ¿Qué marco de referencia era entonces el determinante? En este experimento, la sinquiria cambiaba de forma drástica: desaparecía cuando el probando colocaba su brazo izquierdo (el sano) sobre el derecho. En cambio, si los científicos estimulaban en lugar de las manos los brazos, que no se encontraban cruzados, entonces se mantenía la sinquiria, lo cual indicaba que esta dependía de un sistema local limitado.

Los experimentos de Rapp muestran que la inhibición de la actividad cerebral somatosensorial en ambos hemisferios depende de distintos marcos de referencia: según cuál sea la posición de las manos, neuronas inhibidoras de uno u otro hemisferio se encargan de inhibir el lado «correcto» de la corteza cerebral somatosensorial.

Mas no termina ahí el entramado. La percepción del cuerpo depende también de dónde pongamos la atención, apunta la neuropsicóloga. Cuando el lector se concentra en una de sus manos, esta ocupa su foco de interés; la línea que pasa por el centro de la mano determina el marco de referencia. De ese modo, si se estimula el dedo exterior derecho, siente que ha ocurrido en la derecha, y si se toca el dedo en el extremo izquierdo, siente que ha sido en la izquierda, siendo la representación del estímulo en el cerebro justo la opuesta, cruzada.

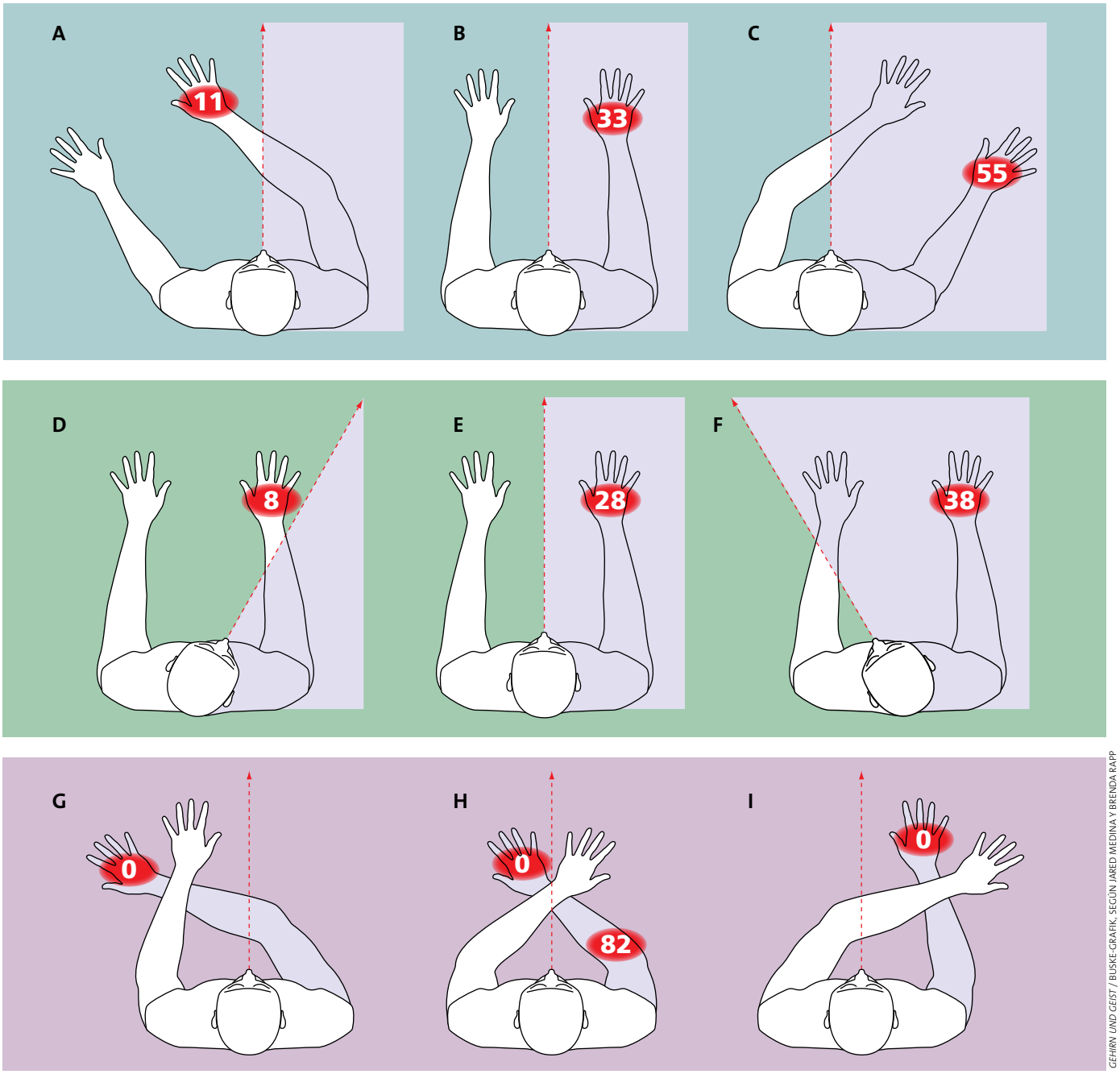
Sin embargo, Rapp especula con la idea de que, cuando se dirige la atención a las dos manos a la

## La ilusión de la mano de goma

**El engaño intencionado del sentido del tacto y de la vista** ilustra el modo en que las personas aprendemos qué pertenece a nuestro propio cuerpo y qué no. Si se deja sobre la mesa, ante el probando, una mano derecha de goma mientras que este pone su propia mano derecha sobre la rodilla, bajo la mesa, y el experimentador acaricia al mismo tiempo el simulacro de extremidad y la mano real con movimientos idénticos, el sujeto percibe lo que ve y lo que siente por igual. De ese modo interpreta que la mano de goma forma parte de su propio cuerpo. Si el investigador deja caer después una araña de plástico sobre la mano de goma, el probando retira la mano auténtica.

El cerebro no interpreta el principio «este soy yo» como algo fijo. La imagen del cuerpo que tiene el encéfalo resulta tan plástica que las personas somos capaces de identificar un objeto externo como perteneciente a nuestro propio organismo. Tal plasticidad resulta sumamente útil, puesto que, con el tiempo, nos permite utilizar una herramienta o una prótesis como si fueran componentes naturales.

## Sensación fantasma en pacientes con lesión cerebral




GEHRN UND GEIST / BUSKE-GRAFIK, SEGÚN JARED MEDINA Y BRENDA RAPP

**Ciertas personas con alteraciones de la sensibilidad** manifiestan sinquiria: cuando se empuja su mano sana, la izquierda, sienten al mismo tiempo un contacto fantasma en la mano que tienen entumecida (la derecha). La intensidad de ese fenómeno varía según la posición de la mano en relación al eje corporal. Si el afectado coloca ambas manos delante de la parte del cuerpo no dañada (mitad izquierda), la respuesta de sinquiria aparece solo en un 11 por ciento de los contactos (*A*). Por el contrario, si mantiene cada mano delante de la mitad del cuerpo correspondiente, siente el 33 por ciento de los golpes también en la mano derecha (*B*). La mayoría de las veces (un 55 por ciento de los casos), el fenómeno se da cuando el paciente coloca ambas manos delante de la parte no afectada (lado derecho) de su tronco (*C*).

En otro experimento (*D, E, F*), el sujeto deja cada mano al lado correspondiente del cuerpo y gira la cabeza hacia uno de los lados hasta que ambas manos aparecen en el campo visual derecho o bien en el izquierdo (*línea de imágenes central*). El resultado es asombroso: si las manos se encuentran en el campo visual izquierdo (el sano), el efecto aparece claramente con menor frecuencia (8 por ciento en *D*).

Las sensaciones fantasma desaparecen cuando el paciente coloca su antebrazo sano (el izquierdo) sobre el antebrazo derecho (*G, H, I*). En cambio, si el científico estimula el brazo derecho en lugar de la mano, entonces la sinquiria permanece (82 por ciento en *H*). Ese fenómeno se debe a que han muerto neuronas inhibidoras de la corteza cerebral somatosensorial dañada.

vez, por ejemplo porque las dos son estimuladas de forma táctil, la línea central se encuentra justo entre ambas. Entonces, los dedos de la mano siniestra situados más a la derecha ya no se representan como derecha sino como izquierda.

Rapp comprobó su hipótesis con el efecto Simon en su versión táctil. En la variante original de la prueba, visual, el probando se halla sentado frente a una pantalla en la que aparece un círculo verde o uno rojo y debe apretar rápidamente un botón situado a la derecha en cuanto aparece un objeto verde; si, por el contrario, sale el objeto rojo, debe apretar el botón que se encuentra a la izquierda. Por lo general, el sujeto reacciona con mayor rapidez cuando el círculo verde aparece en la parte derecha de la pantalla y el rojo, en la izquierda; en pocas palabras, cuando coinciden con el lugar en el que se halla dispuesto el correspondiente botón. Ello significa que la congruencia espacial de estímulo y respuesta acelera la reacción, a pesar de que el lugar donde se halle el objeto no desempeñe ningún papel importante para la tarea en sí misma.

Como estímulo táctil del efecto Simon se utilizó una vibración, bien fuerte, bien débil, que se aplicaba sobre diferentes dedos de una de las manos que el probando mantenía sobre la mesa. Si el estímulo era fuerte, debía apretar con el pie derecho un pedal situado a ese lado bajo la mesa; si la vibración era débil, debía pisar el pedal izquierdo con el pie siniestro.

## Ver y sentir

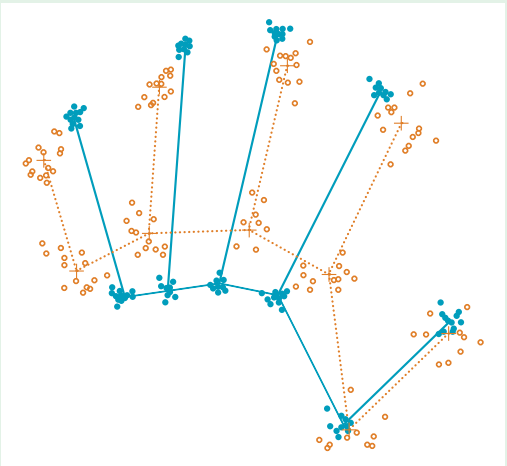
**Patrick Haggard y sus colaboradores,** del Instituto de Neurociencia Cognitiva del Colegio Universitario de Londres, estudian de qué manera colaboran el sentido de la vista y el del tacto. La mera observación de la propia mano puede mejorar las percepciones táctiles: el poder resolutivo del tacto, la posibilidad de distinguir entre puntos de contacto limítrofes, aumenta incluso cuando ya no somos capaces de separar a simple vista los dos puntos.

Sin embargo, la imagen que percibimos de nuestro propio cuerpo no tiene por qué coincidir necesariamente con las proporciones reales. Matthew R. Longo, colaborador de Haggard, solicitó a 100 voluntarios que pusieran la mano izquierda encima de la mesa. Sobre una tabla que ocultaba dicha mano debían marcar los nudillos y las puntas de los dedos de la extremidad no visible. Observó que el dibujo de la propia mano estaba tan distorsionado que parecía una zarpa: los probandos dibujaron una especie de garra mucho más ancha y con dedos harto más cortos de lo que correspondía a las proporciones reales de la mano (*líneas punteadas*).

**En 2009, Longo y sus colaboradores** investigaron si el sentido de la visión influye en la percepción del dolor. Los probandos dirigían la mirada a un objeto de la habitación o a su propia mano mientras se aplicaba a esta un láser especial. El rayo producía un dolor localizado en un punto muy concreto, cuya intensidad debían valorar en el test. Los probandos sentían menos dolor cuando dirigían su mirada a la mano.

Mirar a un punto determinado reduce no solo la sensación subjetiva de dolor, sino también la subyacente reacción del cerebro ante el dolor, fenómeno que confirmó el electroencefalograma realizado mientras se aplicaba el láser sobre la piel de los sujetos. Los investigadores piensan que en el momento que concentramos nuestra atención en el supuesto lugar del dolor, interneuronas inhibidoras en la corteza cerebral somatosensorial atenúan las señales de las células nerviosas adyacentes, de manera que percibimos detalles más sutiles.

A primera vista, los resultados de Longo parecen contradecir la experiencia cotidiana. Cuando se vacuna a un niño, la mayoría de las veces su madre le advierte: «¡No se te ocurra mirar la aguja!». Es probable que guarde incluso razón: mirar directamente el objeto que nos produce daño agudiza la sensación dolorosa. Pero si no se mira fijamente la aguja, sino a la parte del cuerpo afectada, el dolor se reduce.

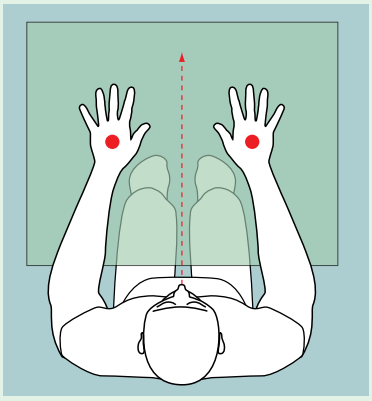


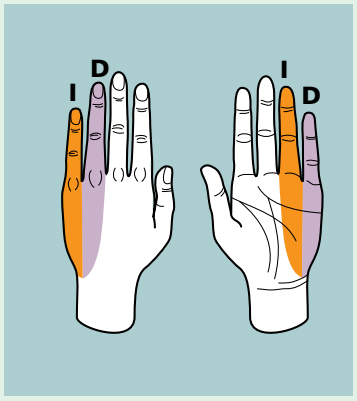
GEHIRN UND GEIST / SEGÚN MATTHEW R. LONGO Y PATRICK HAGGARD

**MANO DESFIGURADA**

La situación real de los nudillos y de las puntas de los dedos (*puntos azules*) de los probandos difiere mucho de la percepción subjetiva que estos tienen de su posición (*naranja*). Las líneas continuas reproducen la proporción media real; las líneas punteadas muestran la proporción estimada.

## La versión táctil del efecto Simon






GEHIRN UND GEIST / BUSKE-GRAFIK, SEGÚN JARED MEDINA Y BRENDA RAPP

**A través de vibraciones se estimula una mano del probando** (*imagen izquierda*). Cuando el estímulo es intenso, el sujeto, que se encuentra sentado, debe apretar un pedal con su pie derecho, pero cuando la vibración resulta débil, debe apretar otro con el izquierdo. Durante el experimento, la persona reacciona con mayor rapidez a la estimulación fuerte (el pie derecho responde) cuando se estimula la mano derecha, y reacciona rápidamente al estímulo débil (el pie izquierdo responde) cuando es la izquierda la que lo recibe.

En una variante del experimento, se estimula el meñique o el anular de la mano izquierda (*imagen derecha*). De nuevo, el probando debe responder a un estímulo intenso con el pie derecho y a un estímulo débil con el izquierdo. Si la mano se halla apoyada con la parte interior hacia abajo, el participante reacciona con mayor celeridad a una vibración débil en su dedo meñique, situado en el extremo izquierdo. En cambio, si da la vuelta a su mano, su pie izquierdo aprieta el pedal con más velocidad cuando el dedo estimulado es el anular, que ahora queda a la izquierda.

## El ejercicio de los dedos girados

Al igual que en el caso de la variante visual del efecto Simon, la velocidad de respuesta dependía de la congruencia entre el estímulo y la reacción. De ese modo, si se estimulaba un dedo «derecho», el probando reaccionaba a las vibraciones fuertes (pedal del pie derecho) más rápido que a las débiles (pedal del pie izquierdo). En cambio, si el receptor de la señal era un dedo «izquierdo», el sujeto de la prueba reaccionaba con más rapidez cuando respondía a una vibración débil, puesto que respondía a ella con el pie izquierdo. Pero surgía una nueva pregunta: ¿qué determina un dedo «derecho» y un dedo «izquierdo»?

Para responder a la cuestión, Rapp aplicó una fuente de vibraciones bajo el dedo meñique y el anular de una de las manos del sujeto. De nuevo, este debía responder a las vibraciones con el pie derecho o el izquierdo, dependiendo de la intensidad del estímulo. A continuación, el probando debía girar la mano de manera que esta descansara sobre el dorso. Rapp estimuló de nuevo ambos dedos, pero ahora el que antes era el «derecho» se encontraba a la izquierda, y el «izquierdo» a la derecha. ¿Qué dedo debía estimularse ahora de forma más débil o más fuerte para que el participante respondiera con la mayor rapidez posible?

Los probandos reaccionaron más rápido cuando se les estimulaba con mayor potencia el dedo que visto desde arriba estaba situado a la derecha (respuesta con el pie derecho). Podía tratarse del anular o del meñique, dependiendo de la posición en que los sujetos hubieran colocado la mano. Al parecer, su percepción respondía conforme a un marco de referencia atencional, pues su foco de atención se encontraba estrechamente relacionado con los puntos que recibían la estimulación, es decir, los dos dedos a los que se aplicaba el estímulo. La línea central pasaba entre ellos.

La variante táctil del efecto Simon demuestra que nuestras sensaciones corporales se orientan según un sistema de referencia variable, en el que podemos influir mediante la atención. Es cierto que el marco somatotópico de derecha e izquierda constituye un sistema de referencia básico; sin embargo, según dónde se sitúe el foco atencional en un momento determinado se superpondrán a este otros múltiples marcos de referencia.

En resumen, la decisión de qué es izquierda y qué derecha en un caso concreto corresponde al observador. También la imagen de las piernas cruzadas que vemos mientras leemos tranquilamente acomodados en la tumbona determina qué identificamos como izquierda o derecha, puesto que para la autopercepción nos servimos, además, de las informaciones somatosensoriales, de los datos visuales.

***Michael Springer*** *es doctor en física y redactor de* Spektrum der Wissenschaft*, edición alemana de* Investigación y Ciencia.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 57

### Para saber más

**Phantom tactile sensations modulated by body position.** J. Medina y B. Rapp en *Current Biology*, vol. 18, págs. 1937-1942, 2008.

**Visually induced analgesia: Seeing the body reduces pain.** M. R. Longo et al. en *Journal of Neuroscience*, vol. 29, págs. 12.125-12.130, 2009.

**An implicit body representation underlying human position sense.** M. R. Longo y P. Haggard en *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, págs. 11.727-11.732, 2010.

**More than skin deep: Body representation beyond primary somatosensory cortex.** M. R. Longo et al. en *Neuropsychologia*, vol. 48, págs. 655-668, 2010.

# Espejito, espejito...

## Algunas reflexiones sobre la conocida, pero enigmática, naturaleza del espejo

VILAYANUR S. RAMACHANDRAN Y DIANE ROGERS-RAMACHANDRAN

EN SÍNTESIS

### Percepción ilusoria

1 Las neuronas espejo nos permiten adoptar el punto de vista de otra persona. También intervienen en la consciencia de uno mismo.

2 En el síndrome del miembro fantasma, las personas amputadas siguen sintiendo el miembro mutilado. Mediante la caja-espejo puede aliviarse la sensación de dolor.

3 También en los pacientes de ictus se ha detectado una cierta recuperación funcional a partir de la realimentación visual.

Los espejos resultan fascinantes. Una fascinación peculiar que seguramente procede de cuando una de nuestras primeras antepasadas homínidas se vio reflejada en un charco y observó una misteriosa correlación entre sus propios movimientos musculares —percibidos internamente— y la realimentación que recibía de los ojos. Más misteriosa todavía —y tal vez no del todo incorrelada— es la facultad de «reflexionar» sobre nosotros mismos, siendo como somos los primeros primates introspectivos. Una capacidad manifiesta bajo formas muy dispares: desde la del Narciso mitológico, al verse reflejado en un lago, hasta la invención de la realidad virtual debida a Jaron Lanier, uno de los pioneros de Internet, y capaz de llevarnos al exterior de nuestro cuerpo.

Curiosamente, se ha descubierto una categoría de células cerebrales, las neuronas espejo, que nos permiten «adoptar el punto de vista de otro», tanto en sentido literal como metafórico («Veo a qué te refieres», decimos). Es posible que tales neuronas permitan incluso que nos examinemos desde el distanciado punto de vista de los demás, por ello adquirimos «consciencia de uno mismo», de lo que hacemos, de cómo vestimos e, incluso, de quiénes somos. Es como si el cerebro estuviera atisbando en un espejo interior.

Todas estas facultades se nos antojan obvias, pero hace algo más de doce años, Eric L. Altschuler y Steve Hillyer, de la Universidad de California en San Diego, y uno de los autores (Ramachandran) describimos un síndrome neurológico nuevo, al que denominamos agnosia especular. Este trastorno se manifestaba en pacientes que, a resultas de un accidente vascular en el hemisferio cerebral derecho, eran incapaces de reconocer que la imagen en el espejo no constituye un objeto tangible. Estos sujetos —sorprendentemente— trataban una y otra vez de tocar, recoger o asir la imagen reflejada, que —afirmaban— era una cosa real situada en el espejo. En todos los demás aspectos mentales, se trataba de personas perfectamente normales; seguían poseyendo un conocimiento abstracto de los espejos y de la naturaleza de su óptica. Tales individuos ofrecen un atisbo de la surrealista «tierra de nadie» que media entre la realidad y la ilusión y nos ayudan a comprender cuán tenue es nuestra captación de la realidad. Por conocidos que nos sean los espejos, no dejan de resultarnos enigmáticos.

### Espejito mágico

Pueden explorarse los aspectos mágicos de los espejos tan solo jugando con ellos. Empecemos con la caja-espejo (*véase la figura de la página 73*). Concebida en un principio para tratar a pacientes con síndrome del miembro fantasma o de ictus (más adelante hablaremos de esta terapia), también puede servir de ameno entretenimiento, experimentando con uno mismo o con amigos. Si el lector se anima a comprobarlo, hágase con el espejo giratorio de la puerta de un botiquín o, incluso, sencillamente, mantenga en vertical un espejo (lo puede sujetar con libros o ladrillos).

Nuestros sentidos, como el de la vista y la propiocepción (detalla la posición de los músculos y articulaciones propias) se encuentran por lo general en buena concordancia. Los mensajes procedentes de los diversos sentidos convergen en el cerebro en el giro angular y en el giro supramarginal del lóbulo parietal, donde toma forma la «imagen» de nuestro cuerpo. En los simios, estos dos giros aparecían en un inicio fundidos en uno

WIKIMEDIA COMMONS / DOMINIO PÚBLICO («NARCISO», DE CARAVAGGIO, 1598; GALERÍA NACIONAL DE ARTE ANTIGUO DE ROMA)

**REFLEJO FASCINANTE**
Cuenta la mitología griega que el joven y bello Narciso rechazó a la enamorada ninfa Eco, razón por la cual la diosa del amor Afrodita le castigó con una maldición: que se enamorara perdidamente de su propia imagen reflejada en el agua.

solo (el lóbulo parietal inferior). Sin embargo, dada la importancia de las interacciones intermodales (en las que interviene más de un sentido), tal lóbulo adquirió en los humanos un tamaño enorme; y se escindió en dos. Desde tan humildes comienzos hemos evolucionado hacia un primate capaz de efectuar proezas tecnológicas fantásticas, en un mono que no se conforma solo con cacahuetes, sino que quiere alcanzar las estrellas.

Volvamos a la caja-espejo. Empecemos con el lado reflectante vuelto hacia la derecha. Ponga su mano izquierda en el mismo lado del espejo, oculta a la vista, y la mano derecha en el lado correspondiente, reproduciendo lo más exactamente posible la postura y ubicación de la mano siniestra que permanece oculta. Mire ahora la imagen de su mano que refleja el espejo. Tendrá la impresión de estar viendo su mano izquierda, aunque no sea así.

Sin dejar de observar la imagen del espejo, empiece a mover sincrónicamente las dos manos (en círculos o separando o juntando los dedos, por ejemplo), de modo que ambas —tanto la oculta como la que se refleja— vayan al compás. Ahora, el toque mágico: deje de mover la mano izquierda (oculta) y siga meneando la derecha. Muévala lentamente, hágala girar u ondular, agite un poco los dedos, pero, no lo olvide, mantenga quieta la mano izquierda. Por un instante, *verá* que la mano izquierda se mueve, pero *sentirá*, al mismo tiem-

po, que permanece quieta. No se preocupe, casi todo el mundo experimenta un cierto sobresalto en esta situación: el cerebro detesta las contradicciones.

**Tendrá la impresión de estar viendo su auténtica mano izquierda, pero no es así**

Otra experiencia más desconcertante si cabe: mueva su mano izquierda al tiempo que mantiene inmóvil la derecha. Esta vez la sorpresa será mayor, al «chocar» la visión y la propiocepción. Mientras sigue con la vista puesta en el espejo, pídale a un amigo que le roce con un dedo su mano derecha. Verá usted que le están acariciando la «mano izquierda virtual», aunque, en realidad, la auténtica mano izquierda, situada tras el espejo, no experimenta tal roce. Este peculiar conflicto sensorial puede darle la impresión de que la mano izquierda ha sido anestesiada, porque usted ve el toque, pero no lo siente.

Con Altschuler observamos que se produce una incongruencia de otro tipo si nos miramos la mano a través de una lente divergente, es decir, reductora (puede encontrar láminas cóncavas adecuadas, de plástico y de bajo coste, en bazares o puestos de venta de museos científicos). En este caso, la mano nos parece mucho más pequeña y alargada de lo que debería ser, lo que provoca una sensación de extrañeza. Al moverla y agitar los dedos, la sensación se torna más paradójica y fantasmal. Nos parece que la mano no nos pertenece, incluso percibimos una efímera experiencia extracorpórea: ¡como si estuviéramos manipulando la mano de otra persona!

## La mano fantasma

Otro tanto ocurre si, mientras camina, nos miramos los pies a través de la lente divergente. Parecen largos, flacuchos y gomosos, como si se hubieran separado de nuestro cuerpo o como si fuésemos un gigante que se inspecciona los pies. Hasta nuestro sentido de «querer» mover una mano o un pie o de que un miembro permanezca anclado a nuestro cuerpo se construye sobre cimientos inseguros.

**¿Se podría «desparalizar» el miembro fantasma con realimentación visual?**

Estos juegos de salón pueden resultar divertidos, pero poseen un considerable interés teorético y clínico. Cuando se amputa un brazo, el paciente sigue sintiendo vívidamente la presencia del miembro mutilado (síndrome del miembro fantasma). Por extraño que parezca, muchas de estas personas creen que pueden mover libremente su «fantasma» (el miembro mutilado contesta al teléfono, saluda, etcétera).

¿Cómo aparece esta sensación ilusoria? Cuando movemos la mano, los centros de comando motor del lóbulo prefrontal emiten una señal que desciende por la médula espinal y llega hasta los músculos de la mitad contraria del cuerpo. Pero, al mismo tiempo, envían un duplicado de esa orden al lóbulo parietal. Como ya hemos indicado, esta región recibe realimentación visual y propioceptiva (sentido de la posición del cuerpo), de manera que se forma un bucle de realimentación para asegurar la exactitud de los movimientos. La pérdida del brazo entraña la desaparición de la realimentación propioceptiva, pero el duplicado de la orden se sigue enviado al lóbulo parietal: el cerebro siente que corresponde a movimientos del miembro fantasma.

Por razones que no comprendemos plenamente, algunos pacientes son incapaces de mover su fantasma. A menudo informan de que sienten dolor en el miembro fantasma o explican que se encuentra «congelado» en una postura peculiar, antinatural e incómoda.

¿Cómo es posible que un miembro que ya no existe esté paralizado? Numerosos de estos pacientes habían sufrido una lesión previa en los nervios que brotan del cordón medular espinal e inervan los músculos braquiales, quedando el brazo intacto, pero paralizado. Durante esa fase, cada vez que la corteza premotora de la región frontal del cerebro enviaba una orden de movimiento al brazo, recibía una realimentación, propioceptiva y visual, que decía: «No, no se está moviendo». Este mensaje acaba estampado en el cerebro como una forma de «parálisis aprendida», un tipo de recuerdo que se traslada, posteriormente, al miembro fantasma.

## Reflejos sanadores

¿Sería posible «desparalizar» un miembro fantasma suministrando al sujeto una retroalimentación visual cada vez que tratase de moverlo? ¿Serviría este proceder para aliviarle el dolor?

En 1996 describimos la técnica de aplicación de la caja-espejo. Es la siguiente: el paciente «coloca» su miembro fantasma paralizado y acalambrado en uno de los lados de la caja y la mano real en el otro. A continuación, mantiene la mirada fija en el espejo mientras realiza movimientos simétricos respecto al plano de este último: abre y cierra el puño, palmea sobre la mesa, etcétera. El individuo percibe la ilusión visual de que su miembro

fantasma ha resucitado y se está moviendo en sincronía perfecta con las órdenes del cerebro. Increíblemente, también *siente* (sinestesia) como si el fantasma se moviera. Para muchas personas amputadas, la sensación de calambre se desvanece por primera vez en años. Para otras, el fantasma llega a desaparecer completa y permanentemente, y el dolor con él. Es la forma del cerebro de afrontar un conflicto sensorial. (En el mismo artículo de 1996 sugeríamos que tales procedimientos podrían resultar eficaces asimismo en otras patologías, entre ellas, los accidentes cerebrovasculares o la distonía focal, una enfermedad neurológica que provoca contracciones musculares involuntarias.)

Los ensayos clínicos han confirmado dichos efectos beneficiosos de la caja-espejo. Asimismo, Herta Flor, del Instituto Central de Salud Mental de la Universidad de Heidelberg, los ha analizado mediante técnicas de neuroimagen.

El dolor del fantasma resulta grave, aunque menos frecuente que los accidentes cerebrovasculares o ictus, daños que pueden provocar problemas de discapacidad. En estos casos, las lesiones en las fibras van de la corteza cerebral a la médula espinal, de manera que pueden provocar una hemiplejia o parálisis completa del lado contrario del cuerpo. Nos preguntábamos si no habría en la parálisis posterior al accidente cerebrovascular una componente aprendida. Tal vez, la inflamación y la tumescencia iniciales causen una interrupción temporal de la transmisión de señales. Esta interrupción, combinada con la verificación visual de la pérdida de movimiento, lleva a una forma de parálisis aprendida, que se suma a la auténtica provocada por la lesión nerviosa.

En 1999, en colaboración con Altschuler, recurrimos a la caja-espejo para tratar la parálisis post-ictus. Llevamos a cabo pruebas en nueve pacientes, en los que observamos una recuperación funcional apreciable, cosa que nos sorprendió, pues la parálisis por accidente cerebrovascular se considera, por lo general, incurable. Postulamos entonces que las células multimodales (conectadas directamente con la visión, la propiocepción y la emisión de órdenes motoras, similares a las neuronas espejo) que habían quedado «durmientes» a causa del infarto cerebral, «resucitaban» mediante la realimentación visual ilusoria creada con el espejo. Ensayos controlados por dos grupos independientes dirigidos, respectivamente, por Jennifer A. Stevens, por entonces en la Universidad Noroccidental e Instituto de Rehabilitación de Chicago, y Christian Dohle, del Hospital de la Universidad de Düsseldorf y del Centro de Rehabilitación Neurológica Godeshöhe (Alemania), han replicado los resultados.

**REALIMENTACIÓN VISUAL ILUSORIA**
La caja-espejo puede crear la ilusión de estar viendo «restaurado» el miembro amputado y aliviar el dolor.

Sabemos que, si bien la mayoría de las fibras nerviosas que parten de la corteza cerebral cruzan hasta el lado contrario del cuerpo (fibras contralaterales), existen algunas que van directamente hacia el mismo lado (fibras ipsilaterales). La razón de que las fibras intactas no puedan «reemplazar» a las lesionadas tras un ictus constituye un enigma clásico. Tal vez al usar el espejo estén siendo «reclutadas» y puestas en servicio. De ser así, podríamos concluir que los espejos no solo sirven para efectuar juegos de ilusionismo; también permiten una comprensión mayor sobre la capacidad del cerebro de integrar diferentes señales sensoriales. Y no menos importante: la realimentación visual, ya proceda de espejos ya de realidad virtual, puede contribuir al tratamiento y a la recuperación de funciones deficientes o mermadas.

***Vilayanur S. Ramachandran*** *y* ***Diane Rogers-Ramachandran*** *investigan en el Centro para el Cerebro y la Cognición en la Universidad de California en San Diego.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 45

## Para saber más

**Phantom limbs, neglect syndromes, repressed memories and freudian psychology.** V. S. Ramachandran en *International Review of Neurobiology*, vol. 37, págs. 291-333, 1994.

**Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors.** Vilayanur S. Ramachandran y Diane Rogers-Ramachandran en *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 263, n.º 1369, págs. 377-386, 1996.

**Rehabilitation of hemiparesis after stroke with a mirror.** E. L. Altschuler, S. B. Wisdom, L. Stone, C. Foster, D. Galasko, D. M. E. Llewelyn y V. S. Ramachandran en *Lancet*, vol. 353, n.º 9169, págs. 2035-2036, 12 de junio, 1999.

# Integración sensorial

El ser humano dispone de cinco sentidos. Para percibir el entorno de forma integral, deben cooperar e incluso, a veces, fundirse entre sí

CHRISTOPH KAYSER

EN SÍNTESIS

### Fusión con sentido

1 El cerebro recibe información proveniente de los órganos sensoriales a través de canales muy diversos. Solo tras su combinación —la integración sensorial— se forma una impresión completa y unitaria de nuestro entorno.

2 Esta integración tiene lugar en fases tempranas del procesamiento neuronal de los estímulos. Los centros cerebrales que están especializados en el procesamiento de un solo sentido utilizan también informaciones de otros canales sensoriales y contribuyen a la combinación razonable de las diferentes percepciones.

3 Un ejemplo para este «cruce de los sentidos»: ciertas zonas de áreas superiores de la corteza auditiva (la corteza auditiva secundaria) procesan estímulos visuales y táctiles. Se podría decir, así, que los ojos y los dedos también oyen.

A nuestra izquierda truena una canción de moda. «¡Entren, entren!», resuena a la derecha. A nuestra espalda, un grupo de adolescentes ríe con estrépito. Y, en algún sitio, llora un niño. Simultáneamente, luces de colores brillan y centellean por doquier, mientras intentamos seguir con los ojos los sinuosos movimientos de la montaña rusa. El desorden de las atracciones de feria inunda nuestros sentidos con un sinfín de estímulos. Y la diversión sería menor sin los empujones de la gente que nos rodea, sin el helado que sujetamos en la mano o sin el olor de las nubes de azúcar y las manzanas de caramelo en nuestra nariz.

Este retazo de tarde de feria pone de manifiesto la ingente cantidad de señales que recibimos simultáneamente del entorno. La compleja impresión general característica de situaciones así se forma a partir de la interacción entre los diversos estímulos recibidos. En estas circunstancias, nuestro cerebro se somete a una tensión máxima. Es lógico, pues, que dicho fenómeno y otros similares capten la atención de la investigación neurocientífica.

Coincidiremos, sin embargo, en que una feria no es el escenario idóneo para analizar en profundidad la compleja fusión de las diversas percepciones de los sentidos, es decir, la integración sensorial. Los investigadores prefieren condiciones medibles y controlables. En especial, interesan las situaciones, en las que el cerebro se autoengaña y genera una imagen falsa de lo que acontece en nuestro entorno. Un conocido ejemplo de tal confusión es la impresión causada por un ventrílocuo. A pesar de que la voz que escuchamos no procede de la boca del muñeco que estamos viendo, experimentamos esa sensación. En la sala de proyecciones de un cine sucumbimos igualmente a la ilusión de que los protagonistas hablan desde la pantalla, cuando sus voces provienen de los altavoces repartidos por toda la sala. Nuestro cerebro parte de la firme convicción de que el origen de lo dicho se encuentra allí donde vemos que los labios se mueven en sincronía con lo oído. Se produce, por lo tanto, una combinación práctica de las percepciones visuales y auditivas.

No solo nos podemos confundir sobre el verdadero origen de los estímulos sensoriales. Podemos engañarnos también sobre su contenido. Harry McGurk y John McDonald, de la Universidad de Surrey, descubrieron a mediados de los años setenta del pasado siglo un interesante fenómeno: procedieron a proyectar para un grupo de voluntarios una secuencia de vídeo de una persona pronunciando la sílaba «ga», pero sincronizaron la escena con la emisión del sonido «ba». Para su sorpresa, los individuos sometidos al ensayo declararon no haber percibido ni lo uno ni lo otro, sino la sílaba «da». Las dos informaciones procedentes de los diferentes sentidos se transformaron en un tercer sonido.

La combinación de los sentidos del oído y del tacto crea confusiones en alguna ocasión. Podemos, por ejemplo, saber cuán húmedas tenemos las palmas de las manos frotándolas entre sí. Pero si al hacerlo oímos un murmullo apreciable, notaremos la piel más seca de repente; si el sonido se torna progresivamente imperceptible o su tono más agudo, volveremos a sentir las palmas crecientemente húmedas.

Estas ilusiones demuestran que el cerebro combina constantemente la información de los órganos sensoriales para elaborar una representación más o menos correcta de nuestro entorno.

**EN EL CARRUSEL DE LOS SENTIDOS**
En las atracciones de feria nos asaltan multitud de estímulos de forma simultánea, lo que constituye una enorme exigencia para nuestro cerebro.

FOTOLIA / SAHUA D

A los investigadores especializados en la percepción humana se les plantea entonces la siguiente cuestión: ¿dónde y cómo se fusionan los sentidos en el cerebro?

Caben, en principio, modelos de procesamiento muy diversos. Uno primero podría consistir en que cada uno de los diferentes sistemas sensoriales del cerebro comenzara a analizar por separado sus propios estímulos y generase en consecuencia una representación acabada del entorno. Así, el sentido de la vista nos proporcionaría la visión de un perro pastor, que ladra tras una valla de jardín blanca, mientras que el sistema auditivo nos anunciaría un ladrido y el sonido de un coche que pasa a nuestro lado. Solo *a posteriori* se integrarían las distintas impresiones sensoriales y se conformaría la impresión general final: un perro pastor ladrando en el jardín delantero de una casa.

## ¿Qué ladra ahí?

Segunda posibilidad: el sistema visual descubre una superficie de mediano tamaño con manchas, alojada en el interior de una extensa área verde. Simultáneamente, el sistema auditivo percibe un ruido repetitivo y de alto volumen proveniente de la mancha. A continuación, el sistema visual registra que la superficie con manchas cambia siempre que el sistema auditivo notifica el ruido. De esta manera, los diferentes sentidos complementan su información en fracciones de segundo, hasta que se forma la impresión final del perro ladrando en el jardín. En esta posibilidad, la integración sensorial tendría lugar en una fase embrionaria del procesamiento de los estímulos.

El primer modelo considera los distintos sistemas sensoriales como compartimentos separados, que se unen entre sí solo hacia el final. El segundo sostiene, en cambio, que cada sentido interpreta desde un principio los objetos percibidos, de acuerdo con las informaciones provenientes de los otros sentidos. Por supuesto, entre esas dos variantes extremas, son imaginables numerosas posibilidades intermedias. El camino que sigue el cerebro se encuentra probablemente entre todas ellas. El quid estriba en averiguar dónde.

Los investigadores de las funciones cerebrales buscan la respuesta con ayuda de técnicas de formación de imágenes; así, la resonancia magnética o la tomografía de espín nuclear. Las moléculas de hemoglobina cargadas de oxígeno se comportan en un campo magnético potente de manera diferente de las que no contienen oxígeno. Si un área del cerebro trabaja de forma intensiva, consume más oxígeno que las regiones anejas y recibirá, por ello, mayor riego. La resonancia magnética registra estas diferencias en la circulación sanguínea y nos suministra una imagen instantánea de la actividad cerebral.

Si las informaciones de los sentidos se procesasen por separado y solo se combinasen hacia el final, deberían existir numerosas áreas especializadas del cerebro que se ocupasen en exclusiva del procesamiento de la información de un sentido. En el caso contrario, en el que la combinación de los sentidos se produciría al principio del proceso, bastaría con la actividad de algunas de estas áreas tan especializadas. Ambas situaciones se percibirían en la tomografía de espín nuclear.

En los últimos años, una serie de pruebas de neuroimagen ha puesto de manifiesto una compleja red de regiones cerebrales que se activan siempre que coinciden informaciones de diferentes sentidos. Desde hacía tiempo se conocía la existencia de áreas asociativas en los lóbulos parietal y frontal de la corteza cerebral, encargadas de procesar informaciones de diferentes canales sensoriales. Pero, en los ensayos, ciertas áreas que hasta ese momento se consideraban responsables de un solo sentido evidenciaron también múltiples funciones.

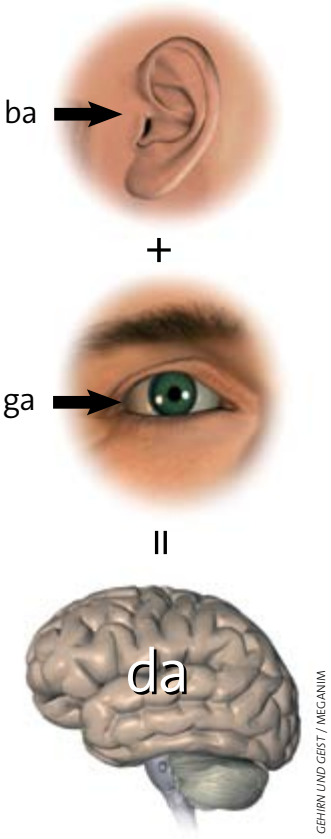
En el año 2005, Jon Driver, del Colegio Universitario de Londres, descubrió que la actividad en la corteza visual de personas que observaban un destello de luz cercano a su mano derecha o izquierda aumentaba cuando sus dedos captaban adicionalmente estímulos táctiles. Sin embargo, la actividad cerebral aumentaba solo cuando los estímulos táctil y visual aparecían al mismo tiempo y, además, en el mismo lado del cuerpo.

Los psicólogos ya conocían esta «amplificación multimodal»: cuando decae la intensidad de un destello de luz lo vamos también percibiendo peor. Pero si escuchamos un tono corto durante el destello, reconoceremos hasta el más débil hilo de luz. Eso sí, siempre y cuando la luz y el tono coincidan en el tiempo.

## Sinergia en el cerebro

Un interesante caso particular es la percepción del lenguaje. La palabra hablada no solo se transmite acústicamente, sino que, además, los movimientos de los labios proporcionan valiosa

**ENGAÑADOS**
Si oímos el fonema «ba», pero observamos cómo los labios de nuestro interlocutor articulan la sílaba «ga», nuestro cerebro transformará la información en el sonido intermedio «da».




GEHIRN UND GEIST / MEGANIM

información. Gemma Calvert, de la Universidad de Oxford, observó en el año 2001 que en la percepción del habla aumentaban la actividad del sistema visual y la del auditivo si los estímulos visuales y auditivos se presentaban en simultaneidad. La imagen de los labios moviéndose influye, por tanto, en el procesamiento de las señales acústicas. A la inversa, las palabras oídas influyen en el análisis visual de los labios. El efecto sinérgico del oído y la vista aparece en zonas del cerebro que eran consideradas hasta ese momento áreas sensoriales separadas.

La imagen silenciosa de un orador basta para excitar de forma mensurable la corteza auditiva, aun cuando el orador solo articule palabras sin sentido. Las muecas, sin embargo, no ejercen ningún tipo de efecto sobre la corteza auditiva. Con ello se pone de manifiesto que esta parte de la corteza actúa de manera muy específica: la integración sensorial de estímulos visuales y acústicos contribuye a procesar el lenguaje.

Por consiguiente, el segundo modelo, que parte del supuesto de una fusión muy temprana de los sentidos, parece más próximo a la realidad. En la misma dirección apuntan diversas mediciones que realizamos en el año 2005 en el Instituto Max Planck de Biología Cibernética, mediante resonancia magnética de alta definición en diferentes zonas de la corteza auditiva de macacos rhesus (*Macaca mulatta*). Esta parte de la corteza se compone a su vez de diferentes unidades. Los impulsos eléctricos provocados en el oído interno por las ondas acústicas entrantes arriban —a través de una estación intermedia en el tálamo— a la corteza auditiva primaria. Desde aquí parten hacia las áreas auditivas superiores, que rodean a modo de un cinturón de pocos milímetros de espesor la corteza auditiva primaria.

Durante los ensayos pudimos medir una mayor actividad en la corteza auditiva de los animales cuando, al mismo tiempo que escuchaban sonidos susurrantes a través de unos auriculares, les estimulábamos la palma de las manos o la planta de los pies con un cepillo. Ello era observable sobre todo en el extremo posterior de la corteza auditiva secundaria, lo que nos lleva a conjeturar que sea ese precisamente el lugar donde se da la integración sensorial.

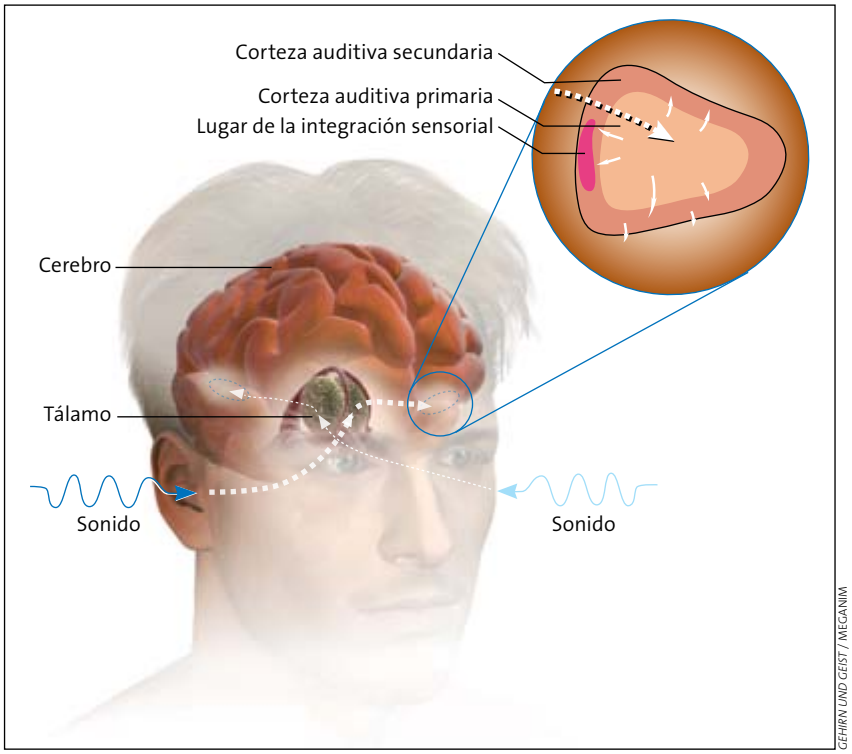
No conocemos la razón por la que son tales áreas cerebrales las responsables de la combinación sensorial. Sin embargo, se apunta la posibilidad de que la parte posterior de la corteza auditiva se halle especializada en la captación de informaciones espaciales; o sea, en reconocer de dónde proviene el sonido. Es de suponer, por lo tanto, que la fusión sensorial que aquí transcurre podría contribuir a asignar a diferentes percepciones sensoriales un mismo origen espacial.

En todo caso, parece aceptable concluir que la integración sensorial se desarrolla en las áreas superiores de la corteza auditiva. De lo que se infiere que la integración acontece de forma muy temprana, pero no tanto como sería posible. Así, se evidencia que el primer modelo, que parte de un procesamiento separado de las percepciones sensoriales, es simplemente falso. El segundo, con la suposición de una fusión de los sentidos lo más temprana posible, parece algo exagerado, aunque se corresponde más con la realidad.

En cualquier caso, parece meridianamente claro que la mayor parte del cerebro se ocupa de combinar las informaciones provenientes de los diferentes sentidos. En comparación, solo una pequeña fracción de nuestro cerebro se dedica a un solo sentido.

***Christoph Kayser*** *es matemático y doctor en ciencias. Investiga la integración de la información sensorial en el Instituto Max Planck de Biología Cibernética en Tubinga.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 25




**EL LUGAR DE LA FUSIÓN**
Los impulsos sensoriales generados en el oído interno llegan a través del tálamo, en primer lugar, a la corteza auditiva primaria y, a continuación, de esta a la secundaria. Aquí se combinan las señales auditivas con las informaciones proporcionadas por otros sentidos.

## Para saber más

**The handbook of multisensory processes.** Dirigido por G. A. Calvert et al. MIT Press, Cambridge, 2004.

**Integration of touch and sound in auditory cortex.** C. Kayser et al. en *Neuron*, vol. 48, n.º 2, págs. 373-84, 2005.

**Multisensory spatial interactions: A window onto functional integration in the human brain.** E. Macaluso y J. Driver en *Trends in Neurosciences*, vol. 28, n.º 5, págs. 264-71, 2005.

# Sinfonía en rojo

Algunas personas ven las notas musicales, saborean el tacto o perciben los números de colores. Las áreas sensoriales de su cerebro se hallan en estrecha conexión. En la sinestesia participan, además, procesos mentales

DANKO NIKOLIĆ Y UTA MARIA JÜRGENS

EN SÍNTESIS

**4 + 3 = amarillo**

1 En la sinestesia, estímulos sensoriales determinados provocan sensaciones que se suponen equivocadas. Estas personas ven sonidos, saborean música o perciben los números de colores.

2 Hasta hace poco, se atribuía el fenómeno a conexiones acusadas entre ciertas áreas cerebrales.

3 Investigaciones recientes revelan que el estímulo sensorial por sí mismo no causa las sensaciones sinestésicas. El contenido semántico desempeña una función importante.

Imagínese el lector que se encuentra en un concierto. De repente, la joven sentada a su lado susurra para sus adentros: «Me encanta ver las notas de ese rojo claro bailando sobre las cabezas de los músicos». Durante el descanso entabla una breve conversación con su vecina de butaca. Tras unas primeras palabras, su interlocutora le comenta: «Su voz suena agradable, como el té de jazmín». Al finalizar la función, mientras toman un refrigerio invitados por los organizadores del evento, pues es noche de estreno, ella levanta insatisfecha la mirada del canapé que acaba de morder. Le advierte: «Tiene un sabor demasiado anguloso».

Es probable que su recién conocida le parezca extraña al lector. Aunque no debe preocuparse, pues la joven no se encuentra mal ni padece una enfermedad, simplemente se trata de una persona sinestésica [*véase* «La sinestesia: ¿una alucinación?», por Philippe Pinel; MENTE Y CEREBRO n.º 37, 2009]. Para los individuos con sinestesia, un estímulo determinado (inductor) evoca una sensación sensorial adicional (concurrente). En la situación concreta de un concierto de música clásica, la mayoría de las personas del público perciben sonidos; los sujetos con sinestesia experimentan, además, sensaciones visuales. Y si la mayoría de los humanos distinguen entre los sabores dulce, agrio y salado, los sinestésicos saborean esquinas y aristas. Incluso el timbre de algunas voces les sugiere, como en el encuentro ficticio anterior, el aroma del té de jazmín.

Existen distintas formas de sinestesia, variedad que depende de los estímulos evocadores y la sensación adicional experimentada. Para una persona con sinestesia grafema-color, las letras poseen un color determinado (ante una R impresa en negro sobre blanco percibe un destello amarillo-dorado; en una W, un brillo azul profundo, por ejemplo). También se han descrito variantes tan raras como números con personalidad, sensaciones táctiles con sabor y orgasmos en color.

Las primeras observaciones empíricas de experiencias sinestésicas se remontan al siglo XIX. Numerosos científicos de renombre, entre ellos Wilhelm Wundt (1832-1920), Gustav Theodor Fechner (1801-1887) y Francis Galton (1822-1911), estudiaron diversos tipos del particular fenómeno sensorial. A comienzos del siglo XX, con el surgimiento del conductismo, decayó, sin embargo, el interés por la sinestesia. Lo que no podía medirse no debía ser objeto de la investigación psicológica, tal era el credo de los representantes de la nueva corriente. Hubo que esperar hasta la década de los noventa para que la investigación de la sinestesia volviera a recibir un impulso. Por esas fechas, el psicólogo Simon Baron-Cohen desarrolló junto con sus colaboradores del Colegio Universitario de Londres un método para registrar de forma empírica las experiencias sinestésicas.

## La autenticidad a prueba

En el test de consistencia, el investigador pide a un sujeto con, pongamos por caso, sinestesia grafema-color que indique el color con el que asocia cada una de las letras del alfabeto. Solicita la misma tarea a una persona no sinestésica. Tras unos meses o incluso años, el científico invita de nuevo a ambos probandos a su laboratorio para que repitan el proceso. El resultado es revelador: el sinestésico vuelve a asignar a cada letra el mismo color que indicó la primera vez que llevó a cabo la prueba, puesto que esa relación se mantiene estable a lo largo de la vida. En cambio, el sujeto no sinestésico cavila largo tiempo, hasta que elige los colores al azar; al fin y al cabo, en la primera prueba también los escogió de forma arbitraria.

DREAMSTIME / DONNA J. KILDAY (*orquesta*); DREAMSTIME / GERMÁN ARIEL BERRA (*luces*)

**COMPÁS BRILLANTE**
Para algunos individuos con sinestesia, un concierto de música clásica evoca espectaculares juegos de colores.

**SENTIDO Y ESTÍMULOS SENSORIALES**

En la tarea Stroop se muestran a los probandos nombres de colores impresos unas veces en el mismo color que la palabra designa y otras en uno distinto (*arriba*). Las personas que participan en la prueba deben nombrar con la mayor rapidez posible el color de las letras impresas. Los mejores resultados se obtienen cuando el color de la tinta y el significado de la palabra coinciden. En una prueba Stroop sinestésica (*abajo*), los sujetos con sinestesia responden más rápidamente cuando el color de impresión se corresponde con el de la sensación concurrente.

Otro método para «medir» la sinestesia consiste en la tarea Stroop. Se muestran a los probandos palabras que designan colores («rojo», «turquesa» o «azul») impresas, bien en tinta del color que corresponde al significado de la palabra, bien en uno distinto. Seguidamente, los sujetos deben nombrar el color de cada término impreso en el menor tiempo posible. Si el significado y la tinta de la palabra impresa no coinciden («rojo» escrito en turquesa, por ejemplo), las personas tardan más en contestar [*véase* «El efecto Stroop. Una colorida trampa verbal», por Rainer Rosenzweig; MENTE Y CEREBRO n.º 47, 2011].

A partir de este principio, también puede aplicarse el procedimiento Stroop adaptado a personas sinestésicas número-color. En este caso se muestra al individuo un estímulo inductor (el número 7) impreso una vez con tinta de la sensación concurrente (amarillo) que el sujeto ha indicado previamente, pero también en colores distintos (por ejemplo, en rojo). Al pedirle que nombre los colores, contestará con mayor rapidez cuando el color de la tinta del número impreso coincida con el de la sensación adicional que experimenta al observar dicha cifra. En 2007 comprobamos que las personas con sinestesia tardan más en resolver este tipo de tareas cuando un número aparece impreso en el color opuesto al de la sensación concurrente (por ejemplo, cuando un 7 «amarillo» está impreso en azul o un 6 «rojo», en verde).

Desde hace algunos años, los investigadores utilizan técnicas de neuroimagen para comprobar la autenticidad de las percepciones sinestésicas. En 2006, Julia Sperling, por entonces en la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Fráncfort, y sus colegas descubrieron por medio de imagen por resonancia magnética funcional que en un individuo sinestésico grafema-color que observaba una letra impresa en negro sobre blanco se activaba la misma región cerebral que en el cerebro de un sujeto no sinestésico que observaba una letra impresa en tinta de color. Se trataba del área V4/V8 de la corteza visual, una zona de la visión cromática.

¿A qué se debía esa coincidencia? En un inicio se atribuyó el origen de la sinestesia a una conexión excepcional de los sentidos. De acuerdo a este principio, la corteza cerebral visual y la auditiva de las personas que ven formas de colores cuando escuchan música deberían estar conectadas de un modo especial. Acorde con este principio, en 2007, Romke Rouw, de la Universidad de Ámsterdam, descubrió mediante imágenes con tensor de difusión que los individuos con sinestesia grafema-color presentaban una conexión más acusada entre las regiones cerebrales que participan en la percepción de los colores y las áreas encargadas del procesamiento de las letras. ¿Se había resuelto el enigma?

## Signos ambiguos

Según reveló el equipo dirigido por Mike Dixon, de la Universidad de Waterloo, otro fenómeno contribuye a la aparición de la sinestesia. Los científicos mostraron a los probandos un signo ambiguo (S) que podía interpretarse bien como un 5 digital bien como la letra S insertada en una palabra («MÚSICA»). En este último caso, los participantes leyeron el signo como una S; las personas sinestésicas indicaron, además, el color

## Sabrosa sopa de letras

Algunas personas experimentan un sabor en la lengua al oír, leer o decir una palabra. Para el sinestésico J. W., la palabra *Gefängnis* («cárcel» en alemán) se acompaña de un intenso aroma a jamón; S. M. percibe el sabor especiado de carne picada en salsa cuando escucha el término «director».

(«Tasty non-words and neighbours: The cognitive roots of lexical-gustatory synaesthesia». J. Simner y S. Haywood en *Cognition*, vol. 110, págs. 171-181, 2009.)

## Sinestesia natación-color

**Nos quedamos sorprendidos** cuando el exnadador de competición Hazem Toutounji se puso en contacto con nosotros para explicarnos un tipo de sinestesia del que nunca habíamos oído hablar. Nos explicó que cada estilo de natación le evoca la sensación de un color. Mientras que la mayoría de las personas que van a la piscina solo ven el azul del agua clorada, ante los ojos de este joven aparece un rojo fuego cuando nada estilo mariposa, un blanco luminoso cuando practica el crol, un azul oscuro cuando se desplaza a braza y un amarillo claro cuando lo hace de espaldas.

Los colores los percibe a modo de una niebla que empaña el agua. Toutounji explica el fenómeno según una lógica particular: «Creo que el color refleja lo que pienso sobre un determinado estilo de natación». Según comenta, siente que el estilo mariposa es «caliente», por eso le resulta rojo; la brazada la relaciona con el frío, de ahí que sea azul. «El crol es un movimiento continuo, por eso es blanco», continúa Toutounji. Y agrega: «El estilo espalda es muy parecido al crol, por lo que tiene un color entre blanco sucio y amarillo».

Más interesante si cabe es el hecho de que este sinestésico percibe las sensaciones concurrentes con solo pensar en nadar. Ello nos evitó trasladar el laboratorio al borde de una piscina para estudiar de cerca la peculiar capacidad. Mediante una tarea Stroop pudimos constatar la autenticidad de la sinestesia de Toutounji. Mostramos al deportista fotografías de los diversos estilos de natación, cada uno impreso en diversas versiones cromáticas: amarillo, azul, rojo y verde (*debajo*). La tarea del nadador consistía en nombrar en la mayor brevedad posible los colores en los que aparecían impresas la imágenes. Contestó más rápido y con mayor seguridad cuando el color de la fotografía coincidía con la sensación concurrente que le producía el estilo de natación correspondiente.

La palabra o la imagen provocan en Toutounji la percepción de color solo si evocan la idea de nadar. «Tengo que imaginarme los movimientos característicos de cada estilo; solo después de ello aparecen los colores», apunta. Por el contrario, el enunciado «una mariposa se posa sobre una flor», no le produce ningún efecto sinestésico acompañante. El contexto no es el adecuado.

(«Swimming-style synesthesia». D. Nikolic et al. en *Cortex*, doi: 10.1016/j.cortex.2011.02.008, 2011)

**MEJOR MARCA EN ROJO**

Con ayuda del test Stroop sinestésico, puede comprobarse si un probando asocia estilos de natación a colores determinados. Los investigadores muestran al participante imágenes de un nadador teñidas de color. A continuación, el voluntario debe nombrar los colores en la mayor brevedad posible. Las personas con sinestesia natación-color responden con mayor rapidez cuando el color de la imagen se corresponde con el fotismo que perciben.

ISTOCKPHOTO / JOSÉ MANUEL GELPI DÍAZ

## Glagolítico para sinestésicos

**En 2009 estudiamos qué ocurría en las personas con sinestesia grafema-color** cuando aprendían un nuevo alfabeto. ¿Acompañarían un color a cada letra después de un período de aprendizaje? De ser así, ¿cuál? Para llevar a cabo el experimento, buscamos caracteres desconocidos para los probandos. El griego y el ruso resultaban bastante usuales; el árabe, demasiado exótico. Al final nos decantamos por el glagolítico croata, un antiguo alfabeto hoy en día obsoleto. Esta elección presentaba otra ventaja: a cada una de las letras del alfabeto latino le corresponde una glagolítica.

Los probandos debían elegir un signo glagolítico (por ejemplo ⰰ, A) y escribirlo en un papel cinco veces (el lector puede sumarse a la prueba si lo desea):

SEBASTIAN KEMPGEN

A continuación, los sujetos debían sustituir la A por la correspondiente letra glagolítica en tres palabras que contuvieran la letra A:

ⰰuto ⰰuto ⰰuto

Tⰰzⰰ Tⰰzⰰ Tⰰzⰰ

Tⰰtiⰰnⰰ Tⰰtiⰰnⰰ Tⰰtiⰰnⰰ

Las personas sinestésicas empezaron a percibir la ⰰ, escrita en negro, del mismo color concurrente que les producía la A. Según parece, las asociaciones sinestésicas resultan flexibles y transferibles a nuevos aprendizajes.

(«Immediate transfer of synesthesia to a novel inducer». A. Mroczko et al. en *Journal of Vision*, vol. 9, págs. 1-8, 2009)

**SÍMBOLOS CRÍPTICOS**
El glagolítico es un antiguo alfabeto eslavo. Según se ha constatado, las personas con sinestesia grafema-color que aprenden estos signos los relacionan a corto plazo con las sensaciones concurrentes (colores) de las letras latinas correspondientes.

con el que solían experimentar sinestésicamente (fotismo) esa letra. En cambio, si el signo formaba parte de una serie de números («1 2 3 4 ⅝ 6»), los participantes lo distinguieron como un «5». Los sinestésicos percibieron, además, el fotismo correspondiente.

Teniendo en cuenta que en ese experimento el estímulo inductor era idéntico en ambos casos (variaba el contexto: palabra o serie de números), cabía pensar que en la sinestesia subyacía, junto con la estrecha conexión cruzada entre dos canales sensoriales del cerebro, otro fenómeno. Debía de existir una instancia superior que asignara a un estímulo ambiguo la sensación concurrente (color) dependiendo del contexto (letras o números).

La sencilla hipótesis de la interconexión empezaba a tambalearse. Julia Simner, de la Universidad de Edimburgo, y Jamie Ward, del Colegio Universitario de Londres, contribuyeron a ello. Pidieron a individuos con sinestesia léxico-gustativa que indicaran el nombre de objetos o animales poco comunes (entre ellos, un ornitorrinco) que aparecían en una serie de fotografías que les mostraban. Cuando los participantes habían reconocido el objeto o, en su caso, animal, pero todavía pensaban en el término correcto —en otras palabras, mientras tenían la palabra «en la punta de la lengua»—, notaron el sabor correspondiente. Es decir, saboreaban la palabra incluso antes de poderla pronunciar. ¿Conclusión? El significado de la palabra, y no el sonido ni la sucesión de letras, suscitaba la sensación concurrente.

Si la semántica determina la percepción sinestésica, no las conexiones sensoriales, entonces las

asociaciones sinestésicas tendrían que ser relativamente flexibles. En 2009 comprobamos que estas asociaciones se transmiten con facilidad a nuevos estímulos inductores. Pedimos a personas con sinestesia grafema-color que aprendieran signos hasta entonces desconocidos para ellas. Elegimos letras del alfabeto glagolítico, en el que a cada uno de los caracteres de dicha escritura eslava antigua le corresponde una letra del alfabeto latino. Pocos minutos después de que los probandos comenzaran a aprenderse el para ellos nuevo abecé, ya asociaban los signos con fotismos. En particular, los mismos con los que relacionaban las correspondientes letras latinas. De este modo, a la ⟁ glagolítica le correspondía el color de la A latina.

## La semántica modela el cerebro

Es posible que la estrecha conexión entre las áreas sensoriales cerebrales que Rouw describió entre sus voluntarios no sea la causa de la sinestesia, sino una consecuencia. Otros ejemplos atestiguan que las conexiones neuronales que se utilizan con frecuencia acaban consolidándose con el paso del tiempo. Si la persona sinestésica emplea a menudo novedosos caracteres glagolíticos y percibe cada vez los correspondientes fotismos, pueden producirse a largo plazo cambios en la anatomía de su cerebro.

La sinestesia pone de manifiesto hasta qué punto pensamiento y sensaciones se encuentran unidos. Aún así, el particular fenómeno sensorial sigue rodeado de misterios: ¿cómo se produce la conexión entre el concepto mental del estímulo inductor y la sensación concurrente?

Para el sinestésico número-color, el 4 es siempre amarillo; para la sinestésica letra-personalidad, la A es masculina y tiene mal humor. De manera similar, atributos sensoriales comunes se corresponden con conceptos determinados: «ruidoso» con música roquera, o «grande» con elefante. Parece, pues, que la sinestesia consiste en una ampliación del significado de un estímulo mediante sensaciones particulares, más que derivar de la fusión de dos impresiones sensoriales. Quizá sería más correcto hablar de *ideastesia,* «la percepción del significado».

***Danko Nikolić*** *es doctor en psicología y desarrolla su labor en el Instituto Max Planck para la Investigación del Cerebro de Fráncfort.* ***Uta Maria Jürgens*** *trabaja en el departamento de neuropsicología del mismo centro.*

### Para saber más

**Synaesthesia: The taste of words on the tip of the tongue.** J. Simner y J. Ward en *Nature*, vol. 444, págs. 438, 2006.

**Neuronal correlates of colour-graphemic synaesthesia: An fMRI study.** J. M. Sperling et al. en *Cortex*, vol. 42, págs. 295-303, 2006.

**Color opponency in synaesthetic experience.** D. Nikolic, et al. en *Psychological Science*, vol. 16, págs. 481-486, 2007.

**Increased structural connectivity in grapheme-color synaesthesia.** R. Rouw y S. Scholte en *Nature Neuroscience*, vol. 10, págs. 792-797, 2007.

**Ideaesthesia: Conceptual processes assign similar colours to similar shapes.** U. M. Jürgens y D. Nikolić en *Translational Neuroscience*, vol. 3, n.º 1, págs 22-27, 2012.

**Psychophysiological evidence for the genuineness of swimming-style colour synaesthesia.** N. Rothen, D. Nikolić, U.M. Jürgens et. al. en *Consciousness and Cognition*, vol. 22, n.º1, págs. 35-46, 2013.

**Coloured alphabets in bi-lingual synaesthetes.** A. Mroczko-Wasowicz y D. Nikolić en *The Oxford Handbook of Synaesthesia*, 2013.

**Synaesthesia as an Ideasthesia: Cognitive implications.** U. M. Jürgens y D. Nikolić en *Synesthesia – Learning and Creativity*, ed. J. Sinha (en prensa).

# Realidad virtual tangible

Los investigadores del Instituto Max Planck de Biocibernética en Tubinga aplican técnicas refinadísimas para explorar la percepción humana. Se trata de poner a prueba el trabajo conjunto de los sentidos

VINZENZ SCHÖNFELDER

EN SÍNTESIS

## Alta tecnología de los sentidos

1 La ciencia que estudia la relación entre los estímulos objetivos procedentes del exterior y la percepción subjetiva de las personas es la psicofísica. Hay una tendencia creciente de los investigadores de aprovechar las posibilidades ofrecidas por la realidad virtual.

2 Experimentos llevados a cabo en el Instituto Max Planck de Cibernética Biológica revelan que nuestro cerebro combina los datos procedentes de distintos canales sensoriales para crear una explicación fiable de nuestro entorno.

3 Existen problemas prácticos que pueden ser resueltos gracias a los hallazgos derivados de las investigaciones abordadas. Así, el uso de simuladores de vuelo en la formación de los pilotos.

Ante mí aparece un túnel largo, en cuyas paredes se observan marcas confusas. Me adentro con cautela. Avanzados dos metros todo resulta ya obscuro a mi alrededor. Una voz salida de la nada me ordena que me gire. En el túnel se observa ahora una esfera flotante, que se mueve siguiendo el desplazamiento de mi mano. Debo colocarla allí donde creo que estaba antes. Sin problemas.

Lo que suena a fantasía desbocada por los efectos de los narcóticos es investigación básica para el departamento de psicofísica cognitiva en el Instituto Max Planck de Biocibernética en Tubinga. El grupo dirigido por Heinrich Bülthoff se propone descubrir el mecanismo de nuestra percepción; es decir, de qué modo nuestro cerebro vincula los estímulos que permanentemente excitan nuestros sentidos y, a partir de ellos, genera una percepción global.

Pero hay una dificultad escondida. Si se deja expuestos a los voluntarios solo a sencillas pruebas de percepción mediante imágenes en una pantalla de ordenador, podemos controlar los parámetros de estimulación, como forma, color o movimiento; pero entonces el entorno de pruebas se aleja bastante de la realidad. En la vida cotidiana, el torrente de informaciones sensoriales procedentes de la vista, el oído, el tacto o el sentido del equilibrio es muy superior.

La solución la aporta la «realidad virtual», donde se permite controlar las condiciones de los experimentos sin tener que renunciar a la semejanza con la realidad. Además, los mundos virtuales son modificables de manera casi ilimitada. Solo deben reprogramarse determinados parámetros.

Desde hace casi quince años, los investigadores del Instituto Max Planck de Tubinga utilizan las técnicas de simulación más avanzadas. En lugar de emplear entornos reales, los científicos sitúan a los voluntarios en entornos generados por ordenador y exploran así los diferentes procesos de percepción: ¿Cómo distingue el cerebro entre estímulos reales y simulados? ¿Cómo debe estar construido un mundo simulado para que tenga apariencia «real»? ¿Y cómo combina nuestro cerebro las señales procedentes de los diferentes sentidos?

Esta última cuestión ocupa a John Butler. Su investigación se centra en el mecanismo de cooperación entre la vista y el sentido del equilibrio, situado en el oído interno, cuando percibimos movimiento. Para ello Butler invita a los voluntarios a entrar en su Laboratorio de Movimiento. Los sujetos se sientan en una confortable butaca frente a una pantalla de proyección. Silla y pantalla se hallan unidas a una plataforma que se desplaza y gira en todas direcciones.

Butler comienza por simular un movimiento hacia delante de manera visual solo, proyectando un campo de estrellas en la pantalla que se mueve hacia los observadores. Recuerda la clásica imagen de los protectores de pantalla de los ordenadores. A continuación, venda los ojos de los participantes y activa un desplazamiento hacia delante de la plataforma entera, con el objetivo de que comparen ambas velocidades de desplazamiento: ¿qué procedió con mayor rapidez, el vuelo por el campo de estrellas o el desplazamiento hacia delante?

Nuestra percepción del movimiento, al igual que del resto de los estímulos, es susceptible de errores. Cuando así ocurre, resulta de gran ayuda disponer de la capacidad de considerar simultá-

TODAS LAS FOTOGRAFÍAS DE ESTE ARTÍCULO: *GEHIRN UND GEIST* / MANFRED ZENTSCH

**EL MUNDO SIMULADO**
El autor del artículo pudo experimentar los descubrimientos novedosos obtenidos en investigación sensorial por el «Cyberneum» de Tubinga.

**UBICACIÓN**
Tras la verdosa fachada de vidrio opalino del «Cyberneum» se esconde el laboratorio donde los investigadores del Instituto Max Planck de Tubinga desarrollan su actividad experimental.

neamente la información procedente de diversos sentidos. Ahora bien, ¿cómo sabe el cerebro cuál es la mejor estrategia en cada momento? ¿Debe confiar más en la vista que en el sentido del equilibrio, cuya información procede del oído interno? ¿Acaso al revés?

La estrategia óptima para ponderar los diferentes sentidos se puede calcular matemáticamente a partir de la fiabilidad de cada canal. Para comprobar si la percepción humana trabaja según dicho patrón ideal, Butler desplazó a la vez el campo de estrellas y la plataforma; los voluntarios disponían, pues, de diversos estímulos sensoriales que entraban a un tiempo por distintos canales. Con ello debería aumentar la precisión de la percepción. Pero el experimento de Butler no permitió observar dicho efecto a la primera, hasta que los investigadores sustituyeron el cielo estrellado por columnas en una superficie plana.

De repente, los participantes pudieron estimar la velocidad con la exactitud que cabía esperar de la combinación óptima de estímulo visual y percepción de aceleración correspondiente al sentido del equilibrio. Según Butler, los resultados de la prueba combinada se aproximan bastante, en media estadística, al resultado derivado ideal de la fórmula de cálculo. Desconocemos, sin embargo, los mecanismos cerebrales responsables de que eso sea así.

La superficie del suelo y las columnas podrían ser decisivas. Son ellas las que aportan una relación de tamaño que permite a los participantes en el experimento estimar las distancias. Pero no funcionó en algunos casos en los que el resultado de la simulación combinada provocó más errores que observar de forma pasiva la pantalla o el desplazamiento de la plataforma. Ignoramos la causa.

A menudo, el cerebro necesita las informaciones de distintos órganos de los sentidos para interpretar los estímulos de manera unívoca. Piénsese que el sentido del equilibrio no distingue entre aceleraciones procedentes de la fuerza de la gravedad y aquellas otras provocadas por fuerzas diferentes. Pese a todo, las confundimos muy esporádicamente.

**A menudo el cerebro requiere informaciones procedentes de diferentes canales sensoriales para interpretar de forma unívoca los estímulos**

## Embriagados por la aceleración

Se lo debemos principalmente a nuestro sentido de la vista. Quien puede mantener la mirada fija en el horizonte o en otro punto de referencia determina con facilidad qué fuerzas fueron desencadenadas por el movimiento y cuáles por la gravedad: solo las primeras transcurren paralelas al horizonte.

El principio se aplica en los simuladores de vuelo. Para simular una aceleración hacia delante, basta dejar caer el asiento del piloto. La fuerza de la gravedad empuja al piloto contra el respaldo del asiento. La referencia del horizonte cambia también. Lo que en la realidad es «abajo», los pilotos lo consideran «detrás». Por eso mismo, los participantes del vuelo simulado sienten una aceleración hacia delante.

Este truco de simulación ha sido analizado en detalle por Daniel Berger, informático de Tubinga, y Paul MacNeilage, de la Universidad de California en Berkeley. Impulsaron hacia atrás a sus voluntarios en la plataforma móvil con distintos niveles de fuerza, al tiempo que recibían impulsos visuales con inclinación y aceleración variables. Acto seguido, los voluntarios debían estimar su movimiento corporal real. ¿Se habían desplazado hacia delante (aceleración) o habían caído (fuerza de la gravedad)?

Se comprobó que, para que la caída no se percibiera como tal, la velocidad de giro de la plataforma no debía sobrepasar determinado umbral. A partir de dos o tres grados por segundo, el cerebro percibe el giro y la ilusión se rompe. Si los participantes veían en la pantalla de proyección un escenario que evocaba la aceleración, acorde con el movimiento hacia delante simulado, no se percibía la caída, aun cuando los parámetros estuvieran por encima del umbral de percepción antes comentado.

**VISTA VIRTUAL DEL TÚNEL**
La pantalla situada más a la derecha muestra el escenario que observa el probando con sus gafas. A través de un micrófono se le indican las órdenes pertinentes acerca de sus tareas; por ejemplo, colocar la pelota de rayas en un lugar concreto del espacio.

Así pues, la percepción visual dominaba sobre el sentido del equilibrio. Si los investigadores además lo combinaban con un pequeño empujón hacia delante, la ilusión percibida resultaba todavía más intensa.

A partir de esos datos, Karl Beykirch, compañero de Butler, espera poder sustituir los complejos simuladores de vuelo por dispositivos más sencillos. Para los pilotos disponer de una experiencia de vuelo lo más real posible puede serles vital. Ello requiere que la percepción que se tenga de las situaciones críticas durante los entrenamientos se equipare a la correspondiente a las situaciones reales. En palabras de Beykirch: «Cuanto mejor comprendamos cómo las personas perciben el movimiento, antes podremos centrarnos en los estímulos importantes».

Una inversión peligrosa de la mencionada ilusión perceptiva aparece en casos de aceleraciones especialmente intensas; por ejemplo, en el despegue de un portaaviones. Pese a que el avión se encuentra realmente en línea horizontal, los pilotos tienen la impresión de que el morro de sus aviones apunta hacia arriba. Dicho engaño se ha cobrado ya algunas víctimas al provocar que los pilotos intentasen corregir la trayectoria hacia abajo y resultar en una colisión con la superficie del agua. El efecto se produce especialmente de noche o en presencia de niebla, ya que con buena visibilidad la vista es capaz de corregir la percepción del sentido del equilibrio.

Otro proyecto llevado a cabo por Daniel Berger y Cengiz Terzibas analiza el mecanismo que permite a los pilotos de helicópteros mantener su inestable aeronave flotando en el aire. De la misma forma que los ciclistas intentan mantener el equilibrio cuando están parados en un semáforo, el helicóptero requiere un control permanente por parte del piloto. Pero ¿qué referencia guía al piloto, el horizonte o el movimiento de todo el entorno? ¿Qué peso tiene en este proceso el sentido del equilibrio?

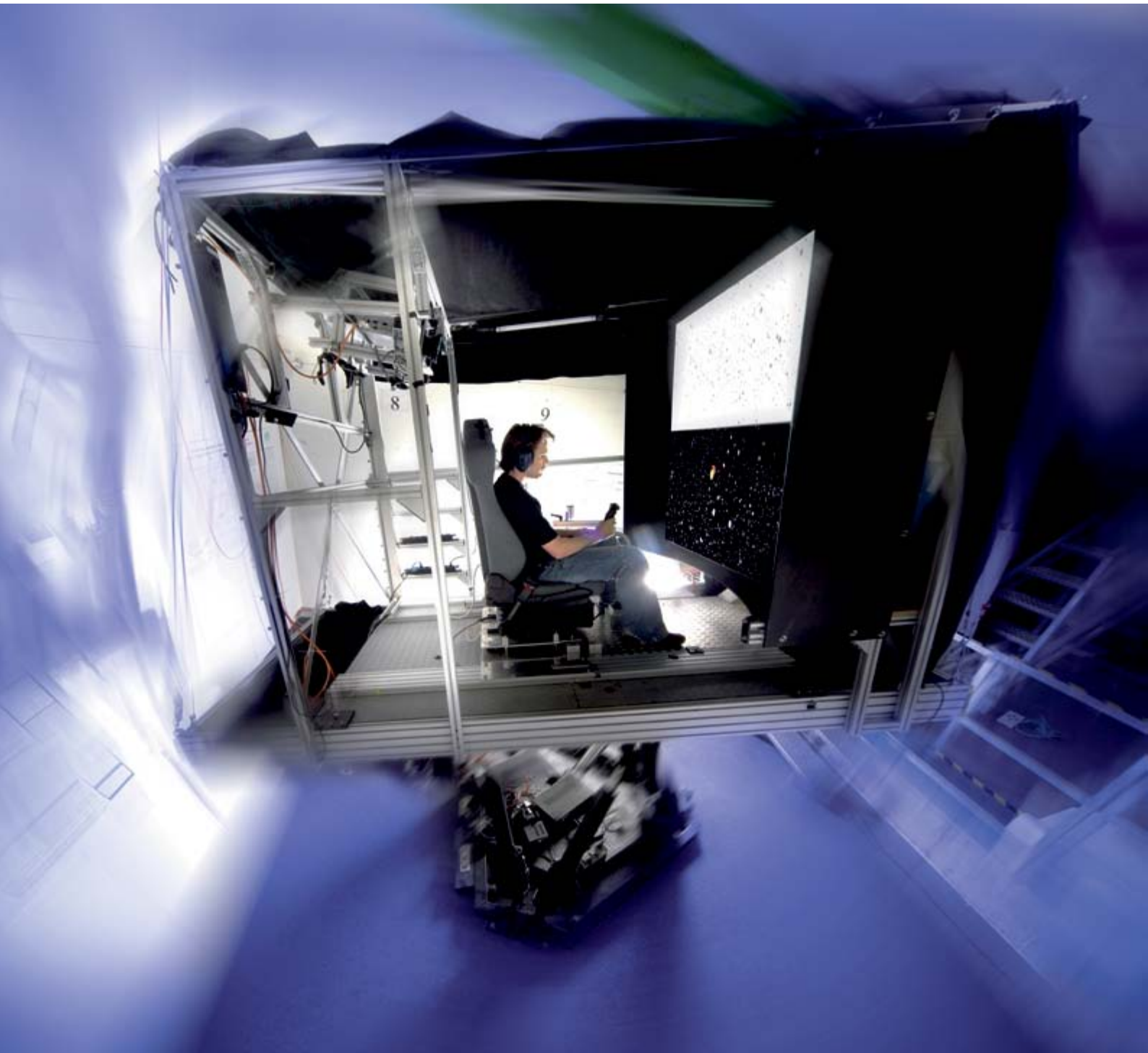
Para dar respuesta a estas preguntas, Berger simuló un helicóptero con máximo realismo en la plataforma móvil. Los seis participantes en el experimento habían sido entrenados con anterioridad; ahora debían mantener el vehículo lo más estable posible usando un mando de consola.

Había cuatro condiciones de contorno distintas: en primer lugar se presentaba una pantalla negra con dos puntos coloreados a modo de referencia. Después se añadía un horizonte llano. La tercera opción era una simple nube de puntos y, finalmente, se combinaba esta última opción con un horizonte. Las cuatro condiciones se aplicaron con y sin movimiento adicional de la plataforma.

Si el dispositivo se mantenía quieto y además no había apenas información visual adicional, los participantes perdían rápidamente el control del helicóptero. Si, por el contrario, se mostraban las nubes de puntos o el horizonte como referencias para la orientación, les resultaba mucho más fácil alcanzar la estabilización. Si adicionalmente se movía la plataforma, los resultados volvían a mejorar, con independencia de lo que mostrase la pantalla. En el caso del mecanismo de control del helicóptero, parece que el sentido del equilibrio es primordial. La rotación revelaba al piloto en qué dirección estaba acelerando, incluso antes de que él lo percibiera visualmente, sentencia Berger.

La plataforma móvil es adecuada para dichos experimentos pero los voluntarios actúan más bien de forma pasiva y su interacción con el mundo virtual se limita a manipular un mando de

**PERCEPCIÓN DE MOVIMIENTO**
En este experimento se investiga cómo el cerebro de los probandos calcula el movimiento simulado óptimamente en la pantalla respecto al movimiento real de la plataforma.



consola. Si es necesario desplazarse con libertad por un mundo virtual, la simple pantalla de proyección ya no basta. Es necesario utilizar unas gafas especiales que proyectan una imagen tridimensional del entorno sobre ambos ojos en función del movimiento de la cabeza.

El primer modelo fue desarrollado por Ivan Sutherland en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), a finales de los años sesenta. Debido a la falta de recursos de supercomputación solo podía visualizar objetos sencillos compuestos de líneas. Además, el espacio de libre movimiento se limitaba a un metro.

Muy distinta y más lujosa es la situación en que se encuentran los participantes en el TrackingLab de Tubinga. Gracias a técnicas inalámbricas, es posible desplazarse sin problemas por una superficie de 12 por 15 metros. En la cabeza llevan cascos con bolas reflectantes que permiten que 16 cámaras de infrarrojos repartidas en la sala carente de ventanas sigan la posición de la persona, allí donde se encuentre.

El voluntario lleva, además, un ordenador portátil atado a la espalda que, en función de las señales de la cámara, proyecta a una velocidad de 60 imágenes por segundo una nueva imagen de la realidad virtual sobre las gafas.

## Pequeños pasos por el mundo artificial

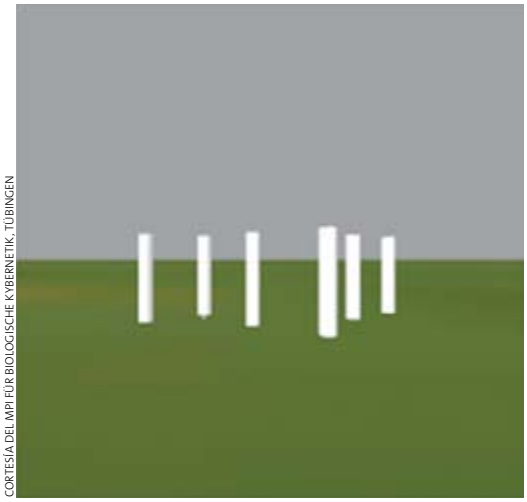
Uno de los primeros experimentos del TrackingLab lo realizó Jennifer Campos. A fin de familiarizarse con el nuevo instrumento de investigación, la psicofísica investigó en primer lugar cuestiones elementales: ¿cómo distinguir el movimiento que se produce al correr en el mundo real del producido en el virtual? Y la respuesta fue que en el mundo virtual las personas se desplazan más lentamente utilizando zancadas más cortas.

A continuación, Campos abordó otra cuestión, a saber, el modo en que percibimos las distancias recorridas a pie ¿Lo hacemos mediante la sensación visual o a partir de las señales que transmite nuestro cuerpo para controlar los músculos afectados? Indicó a los voluntarios que caminasen a lo largo de un pasillo virtual en diferentes condiciones. En una situación estaban quietos y se limitaban a observar el movimiento en la pantalla; en otra, la pantalla proyectaba una imagen negra y las personas se desplazaban prácticamente a ciegas. Tras una distancia variable de algunos metros debían detenerse. Y dejar una bola virtual allí donde ellos pensaban que habían comenzado a caminar.

Si los voluntarios solo percibían el movimiento a través de la pantalla, su estimación de la distancia recorrida siempre era notablemente a la baja, en comparación a cuando recorrían el trayecto a ciegas. Cuando Campos combinaba ambas condiciones —mientras se caminaba de forma virtual se podía visualizar el entorno virtual—, las estimaciones se situaban en la franja intermedia de valores. Mas, cuando la distancia aumentaba, los resultados se asemejaban a los correspondientes a caminar «a ciegas».

En caso de duda, las personas se fiaban más de la propia percepción corporal que del sentido de la vista. Así lo corroboró un ensayo ulterior; si Campos desplazaba el entorno virtual de la pantalla más o menos rápido de lo que correspondía al movimiento «percibido», ello no repercutía sobre la estimación de la distancia.

**El entorno es más que un escenario procesado pasivamente por los sentidos**



CORTESÍA DEL MPI FÜR BIOLOGISCHE KYBERNETIK, TÜBINGEN

**VISIÓN MÁS FAMILIAR**
En el parque de las columnas es más sencillo percibir el movimiento que en el campo de estrellas.

**EN UN PASILLO AMPLIO**
Los investigadores deben prestar atención para que el paseo de Vinzenz por el entorno virtual no lleve contra paredes de verdad.

Tobias Meilinger hizo, por su parte, un experimento con voluntarios utilizando los mundos virtuales del TrackingLab, a fin de probar la capacidad de orientación. ¿Cómo se configura nuestra percepción espacial del entorno cuando deambulamos en el interior de un edificio, por una ciudad desconocida o bien por un laberinto? ¿Cómo se combinan las diferentes vistas en un concepto e imagen únicos?

## Topografía cerebral

A priori, cabría plantear tres posibles explicaciones. La primera hipótesis es la que admite la existencia de un mapa cerebral carente de una orientación dominante. Independientemente de la dirección en la que nos desplazásemos en un momento dado, podríamos siempre determinar con la misma exactitud la ubicación de un punto en el espacio.

A tenor de una segunda opción, el cerebro dispone de un identificador de caminos y coordenadas, una suerte de estrella polar cerebral en relación a la cual registramos todas las direcciones. La diferencia respecto a la primera alternativa radica en que el mapa cerebral debe poder girarse para adaptarse a la dirección en la que miremos.

La tercera opción sostiene que el cerebro almacena todo en la perspectiva en la que percibimos las informaciones del entorno; por ejemplo, dependiendo de la dirección en la que recorremos una calle. En tal caso deberíamos obtener mejores resultados si volvemos a mirar más adelante en dicha dirección.

A fin de evaluar la validez de las diferentes teorías existentes, Meilinger desarrolló un laberinto virtual compuesto por pasillos estrechos en los que se distribuían objetos. Los probandos debían recorrer los pasillos en una dirección. Tras haberse familiarizado con el entorno, debían «mirar» en diferentes puntos del laberinto hacia distintas

direcciones. Desde allí debían indicar, mediante una especie de puntero digital, la dirección donde creían que se encontraban los objetos antes localizados.

Los participantes en el experimento cometieron menos fallos cuando los objetos estaban orientados a lo largo de los pasillos, observación que consolida la opción tercera, aunque no de una forma contundente. Experimentos acometidos por otros investigadores han demostrado que cuando se llevan a cabo en salas utilizamos ejes de referencia paralelos a las paredes. Y en un estudio de 2004, Jennifer Campos demostró que las personas interiorizan planos carentes de referencias al desplazarse libremente por un edificio. Adaptaríamos nuestra estrategia de manera flexible según la situación.

Pero ¿es posible extrapolar tan fácilmente los resultados experimentales del mundo virtual al mundo real? El comportamiento del probando en un mundo virtual depende en primera instancia de cuán rápido es capaz de adaptarse a mirar usando las gafas de visualización, así como al entorno artificial. Algunos apenas necesitan unos minutos para ello, mientras que otros tardan horas y los hay que se desorientan con facilidad. A veces bastan apenas pocos pasos para no saber en qué lugar del TrackingLab se está. Por eso Campos advierte regularmente a los participantes que no se coloquen demasiado cerca de las paredes reales. Transcurrida una hora, la mayoría ya no son conscientes de la auténtica limitación del espacio.

El objetivo de tanto esfuerzo no es por supuesto que los probandos confundan el mundo virtual con el real. Se trata de generar experiencias subjetivas lo más realistas posibles y las consecuentes reacciones a estímulos como objetos que se aproximan u obstáculos. Meilinger explica las dificultades de pasar por encima de un precipicio virtual. Siempre le cuesta obligarse a sí mismo a dar el paso definitivo. Y es en dichas situaciones, aparentemente peligrosas, en las que las personas muestran las típicas reacciones corporales: el corazón late a una velocidad desbordada y la respiración se acelera.

Gracias al rapidísimo desarrollo en el mercado de los juegos de ordenador, las imágenes virtuales son cada vez más realistas. Sistemas gráficos de calidad como los que antes solo podían permitirse centros como el Instituto Max Planck son accesibles hoy también para pequeños laboratorios. No obstante, un problema de las gafas de visualización son los reducidos ángulos de visión que actualmente cubren solo 60 grados, es decir, apenas un tercio del ángulo de visión natural. Pese a que la vista periférica solo la usamos conscientemente de forma esporádica a efectos de orientación espacial, su papel resulta fundamental. Ampliar el alcance visual de los probandos y reducir el efecto «anteojos» son áreas en las que actualmente trabajan los investigadores.

Nuestro entorno es mucho más que un conjunto de escenas que nuestros sentidos procesan de manera pasiva. Campos cree que la sensación de encontrarse en un mundo real se basa en la interacción: cuando los participantes en el experimento pueden mostrarse activos y sus acciones y comportamientos tienen las consecuencias esperadas.

Roy Ruddle, de la Universidad de Leeds, creó en 2006 un espacio virtual en el que los probandos debían localizar objetos. Lo decisivo no era si había o no un realismo especial en las imágenes del entorno, sino que existía la posibilidad de moverse de manera natural por el entorno en lugar de percibirlo solamente. Eso se aproxima al objetivo del TrackingLab, investigar percepción y acción como un círculo cerrado. Los resultados de dichos experimentos interactivos son, no obstante, difíciles de interpretar, ya que los procesos cerebrales involucrados hasta ahora apenas han sido descifrados. A ello se le debe añadir el hecho de que cada probando tiene sus particularidades y que el conjunto aumenta la complejidad a medida que se complican también las tareas a realizar.

Mediante su investigación, los psicofísicos de Tubinga no desean menospreciar el modelo clásico de separar los estímulos en sus componentes elementales. Sin sus resultados, dichos experimentos no serían posibles, opina Heinrich Bülthoff, director del Instituto Max Planck. Él y sus colaboradores se aprestan a desentrañar cómo el cerebro actúa frente a la complejidad del mundo que le rodea. La realidad virtual ofrece un campo de pruebas ideal para tal fin.

***Vinzenz Schönfelder*** *es físico doctorado en el Centro Bernstein para Neurociencia Computacional, en Berlín.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 41

**Al cabo de media hora, los voluntarios ya no son conscientes de las auténticas medidas del espacio**

## Para saber más

**Psychological influences on distance estimation in a virtual reality environment.** K. Takahashi K, T. Meilinger, K. Watanabe Y H. H. Bülthoff en *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, págs. 1-7, 2013.

**The MPI CyberMotion simulator: A novel research platform to investigate human control behavior.** F. M. Nieuwenhuizen y H. H. Bülthoff en *Journal of Computing Science and Engineering*, vol. 7, n.º 2, págs. 122-131, 2013.

**Influences of simulator motion system characteristics on pilot control behavior.** F. M. Nieuwenhuizen, M. Mulder, M. M. van Paassen y H. H. Bülthoff en *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 36 n.º 3, págs. 667-676, 2013.

**Learning to walk in virtual reality.** R. A. Ruddle, E. Volkova y H. H. Bülthoff, en *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 10, págs. 1-11, 2013.

## Webs de interés

www.kyb.tuebingen.mpg.de/de/forschung/abt/bu/

www.cyberneum.de

# Yo sin mi cuerpo

Algunas personas experimentan cómo su yo abandona su cuerpo. Incluso se observan a sí mismas desde el exterior de su ser. Ciertos trastornos cerebrales conllevan vivencias extracorporales. La realidad virtual permite reproducir tal experiencia

OLAF BLANKE, BIGNA LENGGENHAGER Y LUKAS HEYDRICH

¿Qué es el yo? La pregunta del millón en filosofía ocupa en los últimos años también a los neurocientíficos. Equipos de investigación interdisciplinares han estudiado las vivencias subjetivas de forma sistemática. Los resultados obtenidos parecen indicar que la base de la autoconsciencia se fundamenta en mecanismos cerebrales que conectan las señales de los órganos sensoriales para componer una representación corporal global y estable.

En el laboratorio de neurociencia cognitiva de la Escuela Politécnica Federal de Lausana se estudia desde hace unos años la función que desempeñan las señales corporales multisensoriales en la autoconsciencia. Mediante varios métodos neurocientíficos —electroencefalografía (EEG), imagen por resonancia magnética funcional (IRMf), técnicas de la realidad virtual—, biólogos, psicólogos, médicos, físicos, ingenieros e informáticos trabajan codo con codo. En probandos sanos y pacientes neurológicos con trastorno del esquema corporal, investigamos el anclaje de la autoconsciencia. Los resultados los detallamos a continuación.

En estado de vigilia diurno, las personas perciben el yo dentro de sus límites corporales. Sienten el cuerpo como suyo y toman consciencia del entorno a partir de la perspectiva corporal. Un estado de autoconsciencia adecuado supone:

**1. localización del yo** (el yo es percibido dentro del cuerpo como una unidad espacial),

**2. perspectiva del yo** (vemos, oímos y sentimos el mundo desde el interior de nuestro cuerpo),

**3. autoidentificación** (sentimos que nuestro cuerpo nos pertenece).

Bajo circunstancias determinadas, no obstante, dichos aspectos de la autoconsciencia pueden alterarse. Es el caso de la experiencia extracorporal u OBE (de *out-of-body experience*), situación en la que fallan los tres factores a la vez. Los afectados se sienten «incorpóreos», ven el entorno y su propio cuerpo desde fuera; se identifican con su estado ilusorio, no con su condición física.

El relato de 1929 de Sylvan Muldoon (1903-1969), quien creía haber experimentado OBE desde niño, constituye en el escenario del esoterismo el paradigma de tales vivencias: «Flotaba en el aire, en posición horizontal, un par de pies por encima de mi cama... Me acerqué al techo, seguía en posición horizontal y sin fuerzas... Conseguí girarme, y allí... había otro "yo" reposando plácidamente en la cama». Aunque Muldoon padeciera epilepsia, este tipo de episodios también pueden presentarse en personas sanas bajo circunstancias determinadas: anestesia total, sueño, influencia de narcóticos o miedo extremo. Sin embargo, son más comunes en pacientes con trastornos psiquiátricos o neurológicos, entre ellos, la migraña o la epilepsia.

## Descubrimiento casual

Una casualidad nos ayudó en 2002 a reproducir experiencias extracorporales de forma artificial. Una mujer de 43 años padecía graves ataques de epilepsia imposibles de controlar con medicación [*véase* «Convulsiones bajo el microscopio», por S. Remy y C. Elger; Mente y cerebro n.º 52, 2012]. Junto con Theodor Landis y Margitta Seeck, del Hospital Universitario de Ginebra, buscábamos el foco de los ataques en el encéfalo de la paciente para poder extraerlo quirúrgicamente. Mediante la implantación de electrodos estimulamos otras áreas del cerebro para determinar sus funciones.

Hallamos el foco epiléptico en el lóbulo temporal anterior derecho. Pero al estimular el giro angular derecho, una circunvolución cerebral si-

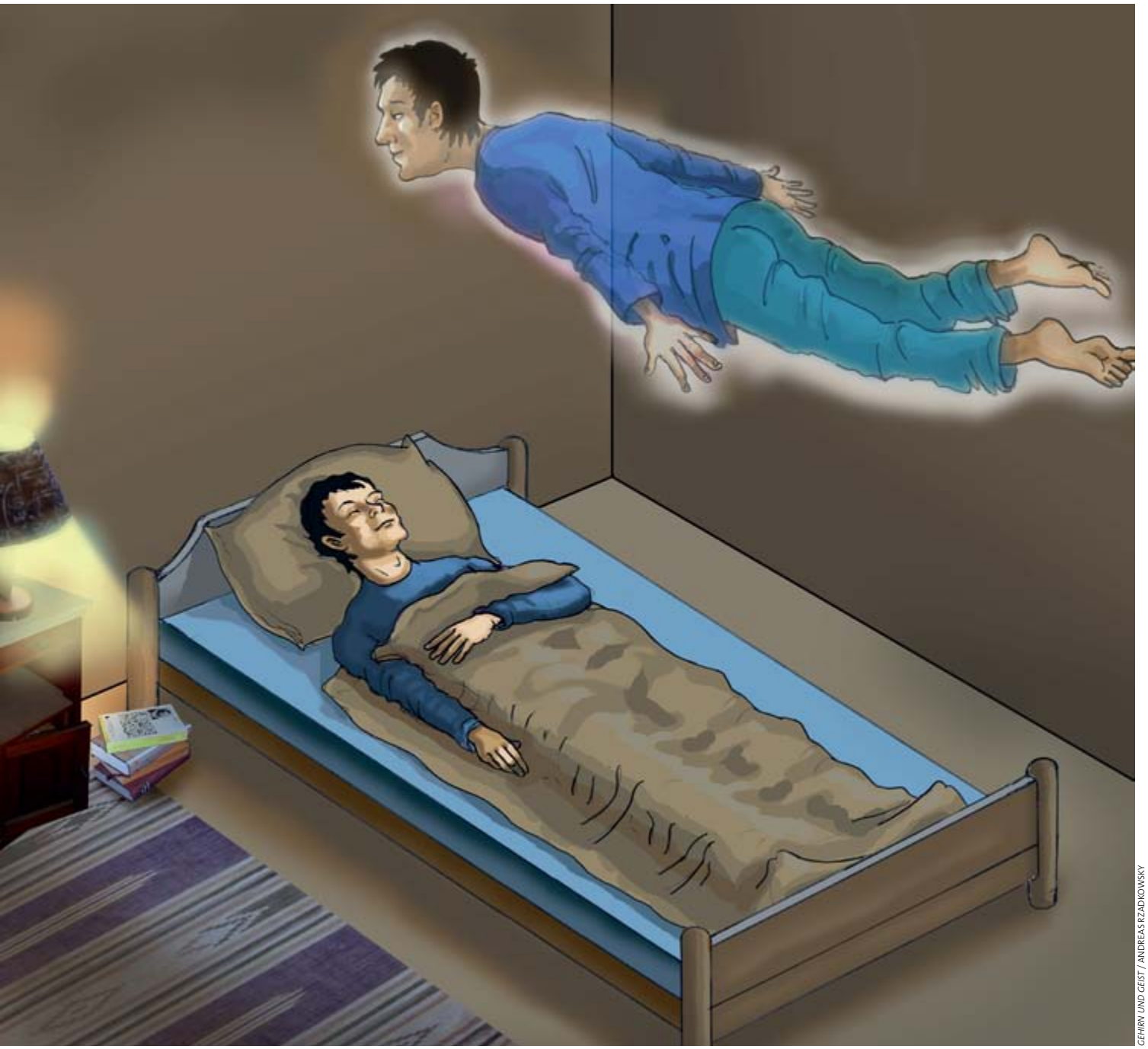
EN SÍNTESIS

### La base del yo

1 El estímulo de determinadas áreas cerebrales, como la circunvolución angular derecha, puede desencadenar percepciones extracorporales.

2 Tales sensaciones pueden provocarse en personas sanas mediante una ilusión sensorial reproducida gracias a la realidad virtual.

3 La autoconsciencia corporal se funda en tres aspectos: la localización del yo, la perspectiva del yo y la autoidentificación.



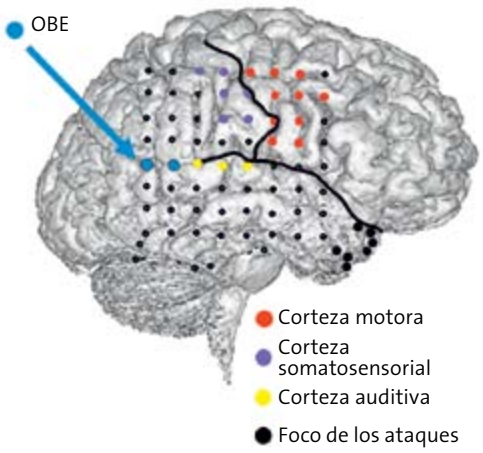
GEHIRN UND GEIST / ANDREAS RZADKOWSKY

**DESPRENDIDO**
Quien tiene una experiencia extracorporal siente que abandona su cuerpo; se observa desde el exterior.

tuada entre el lóbulo temporal y el lóbulo parietal, la paciente nos sorprendió con la sensación repentina de estar hundiéndose o cayéndose. Aumentamos la intensidad de la corriente, a lo que ella respondió con las siguientes palabras: «Me veo desde arriba, tendida en la cama, pero solo me veo las piernas y la parte inferior del tronco». La mujer, quien nunca antes había experimentado una OBE, tenía la sensación de estar flotando dos metros por encima de su lecho. Acabábamos de encontrar un área del cerebro cuya actividad guardaba relación directa con las experiencias extracorporales [*véase* «En el umbral de la muerte», por Detlef B. Linke; MENTE Y CEREBRO n.º 7, 2004].

La circunvolución angular procesa varias señales corporales: el sentido del tacto, el equilibrio, la vista, así como la propiocepción. Esta última registra la posición y el movimiento de los músculos, los tendones y las articulaciones, y al mismo tiempo procesa otras informaciones espaciales y corporales. Suponemos, por tanto, que las experiencias extracorporales presentan dos causas: la estimulación sensorial contradictoria en

**BOTÓN DE EYECCIÓN**
La aplicación de estímulos eléctricos en la circunvolución angular derecha de una paciente epiléptica (*puntos azules*), desencadenó una experiencia extracorporal. Los demás puntos indican otros centros de estimulación en la corteza motora (*rojo*), somatosensorial (*lila*) y auditiva (*amarillo*). La región cerebral que desencadenaba los ataques epilépticos se encuentra en el lóbulo temporal anterior (*puntos negros*).




CORTESÍA DE OLAF BLANKE

la circunvolución angular provoca, por un lado, la disolución de la sensación de unidad en el cerebro entre diversas representaciones corporales; por otro, corta la conexión entre tales representaciones y las del entorno espacial inmediato. Ambas alteraciones de la percepción del cuerpo parecen necesarias para la experiencia extracorporal.

Los estudios que hemos llevado a cabo en personas con trastornos del esquema corporal señalan qué mecanismos cerebrales podrían esconderse tras la consciencia del yo anclada en la percepción del cuerpo. No obstante, escasean los casos clínicos semejantes. Tampoco podemos determinar hasta qué punto nuestros resultados valdrían para individuos sanos.

## En busca del yo

**Los filósofos llevan largo tiempo estudiando** la relación entre el cuerpo y el yo. El problema mente-cuerpo se remonta a los antiguos pensadores griegos como Platón (428/427-348/347 a.C.), aunque fue René Descartes (1596-1650) quien dio al debate el empujón determinante. El filósofo distinguía entre «el espíritu y la materia»; sostenía que «es posible que el espíritu exista sin la materia [y el cerebro]». Tales pensamientos le condujeron a la frase quizá más citada de la historia de la filosofía occidental: *Cogito ergo sum* («Pienso, luego existo»).

Ese dualismo es rechazado en la actualidad por la mayoría de los filósofos, psicólogos y neurocientíficos, quienes se concentran en los mecanismos cerebrales que intervienen en la autorreflexión. Los aspectos superiores de la autoconsciencia se manifiestan en los seres vivos que se reconocen en un espejo, que poseen memoria autobiográfica o que utilizan un lenguaje con pronombres de primera persona, como «yo» o «mío». Investigadores, entre ellos el neurólogo Josef Gerstmann (1887-1969), el psicólogo James Gibson (1904-1979) o el filósofo William James (1842-1910), habían reconocido con anterioridad el significado de aspectos fundamentales del yo, los cuales se manifiestan en las señales sensoriales corporales y su procesamiento en el cerebro.

Por este motivo decidimos hace unos años analizar las bases neuronales de la autoconsciencia en personas sanas en condiciones controladas. Para ello nos inspiramos en un experimento del año 1899. El psicólogo George Malcolm Stratton (1865-1957) se colocó un espejo sobre la cabeza de tal forma que podía verse de pie a unos metros delante de sí mismo. Después de pasearse con tal aparato por su ciudad natal, Berkeley, durante tres días, Stratton tenía la sensación creciente de encontrarse fuera de su cuerpo. Experimentaba su yo en el lugar de su propia imagen visualizada en el espejo.

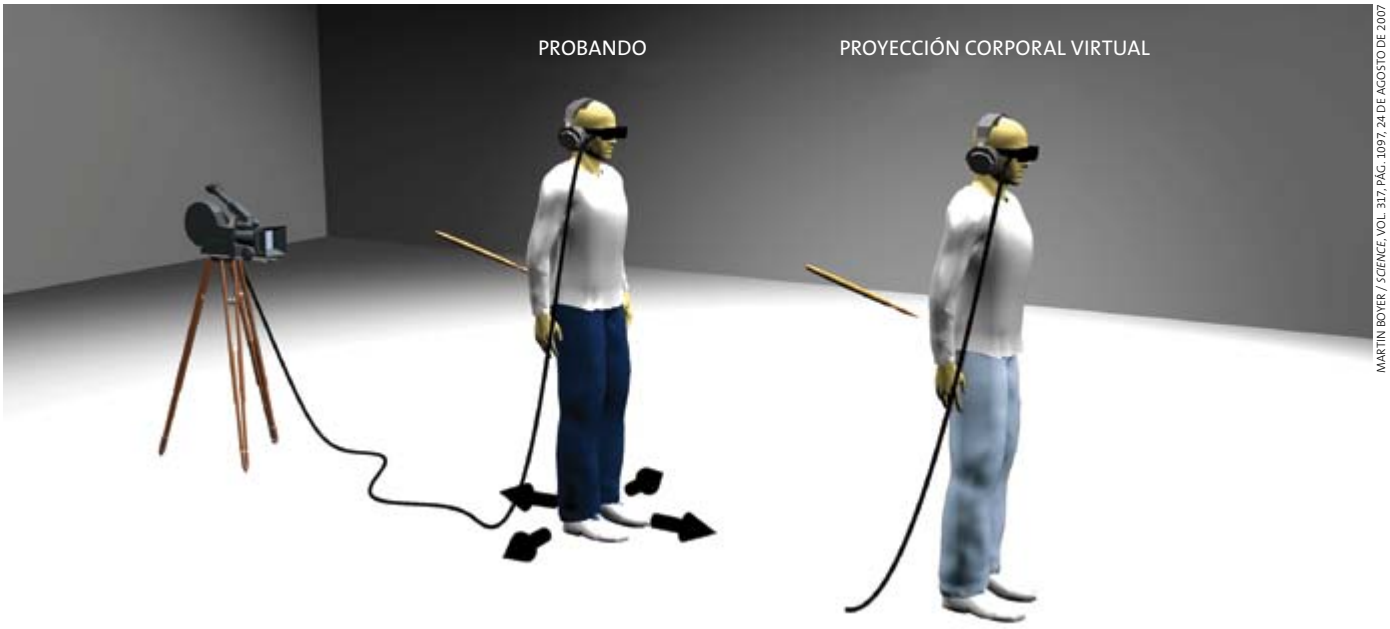
En 2007 construimos, con la tecnología de vídeo más avanzada, algo parecido en nuestro laboratorio. En lugar de un espejo utilizamos unas gafas 3D, en las que proyectamos una grabación del probando de modo que se veía de espaldas a dos metros de sí mismo. A continuación tocamos su espalda con un bastón. Los participantes que observaron la acción a través de las gafas, tuvieron la extraña sensación de notar el bastón no solo en su propia espalda sino también en la de la imagen proyectada, como si el cuerpo virtual formara parte de su yo. La ilusión se desvanecía cuando la proyección mostraba los toques en diferido, es decir, cuando las acciones reales y las virtuales no estaban sincronizadas.

No solo la identificación del yo, sino también la localización se alteraban en caso de sincronización. Situamos a nuestros probandos dos pasos hacia atrás con los ojos cerrados y les pedimos a continuación que volvieran a su sitio inicial. Todos aquellos que habían sido tocados al mismo tiempo que su alter ego se dirigieron con plena determinación hacia la figura virtual. No obstante, en los casos en que los estímulos no se hallaban sincronizados, los sujetos volvieron a su posición original.

## Ver y sentir

Ese experimento y otros más demuestran la importancia que desempeña una buena integración multisensorial de las señales corporales para la autoconsciencia. También revela que la localización subjetiva del yo en el propio cuerpo, por lo general muy estable, requiere un trabajo activo del encéfalo. Dado que esta percepción es manipulable en personas sanas, puede investigarse de forma sistemática.

Resulta todavía más sorprendente que las personas no solo se identifiquen con un cuerpo virtual,




MARTIN BOYER / *SCIENCE*. VOL. 317, PÁG. 1097, 24 DE AGOSTO DE 2007

**VIDEO ERGO SUM**
Los probandos que observan a través de unas videogafas cómo alguien toca su cuerpo con un bastón por la espalda se identifican con esta proyección corporal virtual.

sino que además asuman las percepciones elementales en la propia superficie corporal. Constatamos este hecho en 2009 cuando estudiamos cómo varía la representación cerebral de estímulos al tacto durante la ilusión descrita anteriormente. Para ello, usamos el efecto de congruencia multisensorial visuo-táctil (CEE, de *crossmodal congruency effect*), gracias al cual puede medirse de forma objetiva la influencia que ejercen los estímulos visuales sobre nuestra percepción corporal táctil.

Normalmente reaccionamos con más rapidez ante un estímulo al tacto si lo vemos en el lugar de la superficie corporal correspondiente; es decir, si la información de varias señales sensoriales, la visual y la táctil en este caso, es coherente. Para comprobar si la representación cerebral de estímulos táctiles se desplaza del mismo modo al cuerpo virtual, tal como observamos que ocurría con la localización del yo, introdujimos algunos cambios en nuestro experimento anterior. Suministramos un breve estímulo vibratorio a nuestros probandos mientras ellos observaban a través de las gafas 3D cómo se encendía una lucecita en la misma o en otra parte de la espalda de la imagen virtual. A continuación, les pedimos que indicaran, lo más rápido posible, dónde habían sentido la vibración. Si los sujetos habían recibido el estímulo en el mismo lugar y, por tanto, se habían sentido más identificados con su alter ego, el efecto de congruencia era mayor; al contrario, en el caso de una vibración no sincronizada, los probandos se sentían menos o nada identificados con la imagen virtual. Ello indica que el cerebro también había percibido el espacio táctil de forma desplazada en el cuerpo virtual.

Por supuesto, las sensaciones de nuestros voluntarios en el laboratorio no son comparables a la intensidad de una experiencia extracorporal desarrollada por completo. No obstante, nuestros experimentos muestran una forma sistemática de estudiar la consciencia del yo. A pesar de que los datos obtenidos hasta ahora apuntan a una función clave de los lóbulos temporal y parietal derechos, existen indicios de que intervienen otras áreas cerebrales. Tanto algunas áreas del lóbulo frontal como la corteza prefrontal medial o precúneo, que a su vez cuenta como una región del lóbulo parietal y desempeña una función relevante en la autopercepción, contribuyen a la consciencia del yo. También participan la corteza somatosensorial primaria, la cual procesa estímulos de presión y tacto, así como la corteza vestibular, que se encarga del sentido del equilibrio.

Es probable que algunas de esas áreas cerebrales se activen cuando entran en juego aspectos del yo como la memoria autobiográfica, el autoconocimiento y el lenguaje. Esperamos que las investigaciones futuras nos permitan dar una respuesta científica a la búsqueda del ser y la consciencia.

***Olaf Blanke*** *es neurólogo y dirige el laboratorio de neurociencia cognitiva de la Escuela Politécnica Federal de Lausana. La neuropsicóloga* ***Bigna Lenggenhager*** *y el médico* ***Lukas Heydrich*** *forman parte de su equipo de investigación.*

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 52

## Para saber más

**Video ergo sum: Manipulating bodily self-consciousness.** B. Lenggenhager et al. en *Science*, vol. 317, n.º 5841, págs. 1096-1099, 2007.

**Keeping in touch with one's self: Multisensory mechanisms of self-consciousness.** J. E. Aspell et al. en *Public Library of Sciences One*, vol. 4, n.º 8, e6488, 2009.

**Illusory own body perceptions: Case reports and relevance for bodily self-consciousness.** L. Heydrich, S. Dieguez, T. Grundwald, M. Seeck, O. Blanke, en *Consciousness and Cognition*, vol. 19, n.º 3, págs. 702-710, 2010.

# VISITE NUESTRA WEB

## www.investigacionyciencia.es

**FUENTE DE INFORMACIÓN DE REFERENCIA**
Más de 10.000 artículos elaborados por científicos expertos.

**ORGANIZACIÓN TEMÁTICA**
Consulte todos los contenidos de la página web organizados por materias científicas.

**BUSCADOR REFINADO**
Obtenga resultados más precisos con los nuevos filtros de búsqueda.

**HEMEROTECA DIGITAL**
Acceda a todas nuestras revistas digitalizadas en pdf.

**ARTÍCULOS INDIVIDUALES**
Adquiera por separado los artículos que más le interesen.

**ACTUALIDAD CIENTÍFICA**
Reseñas de trabajos científicos actuales elaboradas por nuestro equipo editorial.

**SCILOGS**
Nuevas bitácoras de ciencia, dirigidas por investigadores expertos.

**NUEVAS SUSCRIPCIONES**
Acceda a todas nuestras publicaciones en el formato que le resulte más cómodo (papel, digital o ambos).

**BOLETINES TEMÁTICOS**
Reciba gratis selecciones periódicas de todos nuestros contenidos sobre una materia determinada: medicina y salud, energía y medioambiente, astronomía...

**REDES SOCIALES**
Comparta nuestros contenidos en Facebook, Twitter y Google+.

**SINDICACIÓN DE CONTENIDOS**
Artículos, noticias, blogs...

Y ahora síganos también en
**Facebook** y **Twitter**

# CATÁLOGO DE PRODUCTOS

## PROMOCIONES

### 5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

**Ahorre un 20 %**

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO*
o 5 ejemplares de *TEMAS*
por el precio de 4 = 26,00 €

### SELECCIONES TEMAS

**Ahorre más del 30 %**

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

❶ ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos

❷ BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas

❸ COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información

❹ FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos

❺ CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales

❻ GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin

❼ MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo

❽ CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima

❾ NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy

❿ LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

### TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €

Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

## MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud

## BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

**Edición en rústica**

| N.º ISBN | TITULO | P.V.P. |
|---|---|---|
| 012-3 | El sistema solar | 12 € |
| 016-6 | Tamaño y vida | 14 € |
| 025-5 | La célula viva | 32 € |
| 038-7 | Matemática y formas óptimas | 21 € |

**Edición en tela**

| N.º ISBN | TITULO | P.V.P. |
|---|---|---|
| 004-2 | La diversidad humana | 24 € |
| 013-1 | El sistema solar | 24 € |
| 015-8 | Partículas subatómicas | 24 € |
| 017-4 | Tamaño y vida | 24 € |
| 027-1 | La célula viva (2 tomos) | 48 € |
| 031-X | Construcción del universo | 24 € |
| 039-5 | Matemática y formas óptimas | 24 € |
| 046-8 | Planeta azul, planeta verde | 24 € |
| 054-9 | El legado de Einstein | 24 € |

## TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida

## Cuadernos MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social

## INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

## GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

| | España | Otros países |
|---|---|---|
| 1er ejemplar | 2,00 € | 4,00 € |
| Por cada ejemplar adicional | 1,00 € | 2,00 € |

**Para efectuar su pedido:**
Teléfono: (34) 934 143 344
A través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

# MENTE y CEREBRO

LA REVISTA DE PSICOLOGÍA Y NEUROCIENCIAS

Disponible el n.º 62

## EL LEGADO DE FREUD

La neurociencia demuestra la eficacia del psicoanálisis

**La carrera contrarreloj para tratar el ictus**

**Las ventajas de manuscribir**

**Memorias casi perfectas**

**SERIE**
**Técnicas de la neurociencia: Neuroimagen por tensor de difusión**

**Y más...**

**Para suscribirse:**

www.investigacionyciencia.es
Teléfono: 934 143 344
administracion@investigacionyciencia.es

Prensa Científica, S.A.